UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Les smectites du Burundi : caractérisation ; génèse ; aspects géotechnique, agricole et industriel

Bucumi, Alexis; Sous la direction de : Luc Tack

1992
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2206

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
DE LA TERRE

LES SMECTITES DU BURUNDI: CARACTERISATION; GENESE; ASPECTS GEOTECHNIQUE, AGRICOLE et INDUSTRIEL.

par

Alexis BUCUMI

Directeur : Luc TACK

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Licencié en Sciences Géologiques et Minéralogiques.

BUJUMBURA, 1992

A ma famille,

A tous ceux qui me sont chers,

Dans l'UNITE et l'AMOUR,

je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS.

Au terme de ce travail, il va sans dire que nous avons bénéficié de l'aide au moment de son exécution. Ainsi avons-nous un grand plaisir d'exprimer nos vives remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Notre gratitude va spécialement à Monsieur **Luc TACK** qui, en plus de sa grande contribution scientifique dans notre formation de géologue, a proposé notre sujet et en a assuré la direction. Qu'il trouve ici l'expression de la grande estime que je porte à sa personne pour l'effort qu'il a fourni pour suivre nos travaux par voie de correspondance.

Que Monsieur **Jacques THOREZ** reçoive l'expression de mes remerciements pour avoir accepté de relire le manuscrit du présent travail lors de son court séjour à la Faculté des Sciences comme Professeur visiteur. Ses suggestions ont apporté à ce travail de très nombreuses et utiles améliorations.

Ma gratitude à Monsieur **Goemaere ERIC** qui m'a été d'une aide très précieuse pour l'interprétation des diffractogrammes. Sans lui, ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Nous exprimons notre grande reconnaissance à l'équipe du Laboratoire de Mécanique du Sol (Faculté des Sciences Appliquées de l'Université du Burundi), dirigé par le Professeur **Müller K.**, qui a analysé les caractéristiques géomécaniques de nos échantillons.

Au Département des Sciences de la Terre dont la direction est confiée à Monsieur **Louis NAHIMANA**, Professeur au dit Département de la Faculté des Sciences (Université du Burundi), à l'abbé **Léonidas NITEREKA**, pour la contribution matérielle à la réalisation de ce travail, nous disons grand merci.

Que Madame **Dévote NIBITEGEKA** et Monsieur **Elysée NYABENDA** trouvent ici l'expression de notre grande satisfaction pour nous avoir pris en charge lors de la finalisation de cet ouvrage.

A madémoiselle **Léocadie NDIKUMANA** et messieurs **Mohamed KHALID, Frédéric NDIKUMANA, Arthémon NIRAGIRA** et **Jean MUNYAKAYANZA et Astère BIGIRIMANA** qui m'ont été d'une aide précieuse lors de la dactylographie du présent travail, un profond remerciement leur est exprimé.

Au dessinateurs du Département des Sciences de la Terre qui ont mis au point nos documents cartographiques et figures, nous disons merci.

Que tous les Professeurs de la Faculté des Sciences ainsi que les Professeurs visiteurs, que tous ceux qui ont fourni leurs concours, tant intellectuel, spirituel que matériel (je ne pourrais pas les citer de peur d'en oublier les plus importants), trouvent dans ce travail la digne reconnaissance de leurs efforts.

Alexis BUCUMI.

TABLE DES MATIERES .

page

CHAPITRE I: DEFINITIONS ET GENERALITES. 1

I.1. DEFINITIONS. 1

I.1.1. "Smectite" et "argile smectique". 1

I.1.2. "Argile". 1

I.1.2.1. Au sens géologique. 1

I.1.2.2. Au sens granulométrique. 2

I.1.2.3. Au sens minéralogique. 2

I.1.2.4. Définition générale. 2

I.1.3. Aspects structuraux des minéraux argileux. 3

I.1.4. Définition, structure et classification des minéraux argileux du groupe des Smectites. 5

I.1.5. Aspects chimiques des minéraux argileux du groupe des Smectites. 10

I.1.6. Conclusion. 11

I.1.7. Classification "écologique" des argiles et définition des "vertisols" et "sols vertiques". 12

I.2. INTERET DU SUJET. 16

I.2.1. Domaines d'application des Smectites. 16

I.2.1.1. En technologie. 16

I.2.1.2. En géologie. 22

I.2.1.3. En agrologie. 22

I.2.1.4. En géotechnique. 22

I.2.2. Travaux antérieurs. 23

I.2.3. Justification du choix du sujet et plan du travail. 24

I.3. GENESE DES SMECTITES. 24

I.3.1. Dégradation des micas. 25

I.3.2. Néoformation des Smectites dans les feldspaths en voie d'altération. 26

I.3.3. Altération hydrothermale. 27

I.4. LE MILIEU PHYSIQUE DES SMECTITES AU BURUNDI. 28

I.4.1. Situation géographique. 28

I.4.2. Cadre géologique et géomorphologique général. 28

I.4.3. Cadre climatique général. 30

I.4.4. Conclusion. 30

I.5. OCCURRENCE DES SMECTITES AU BURUNDI. 31

I.5.1. Inventaire des "sites à Smectites". 31

I.5.2. Limites du travail. 31
I.6. CONDITIONS D'EXECUTION DU TRAVAIL. 32
CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX ETUDIES. 33
II.1. La région de l'Imbo-Nord. 34
II.1.1. Situation géographique. 34
II.1.2. Contextes géologique et pédologique. 34
II.1.3. Observations de terrain et description de profils. 36
II.1.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). 38
II.1.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. 38
II.1.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques). 43
II.2. La région de l'Imbo-Centre. 45
II.2.1. Situation géographique. 45
II.2.2. Contextes géologique et pédologique. 45
II.2.3. Observations de terrain et description de profils. 46
II.2.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). 48
II.2.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. 48
II.2.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques). 51
II.3. La région de Bujumbura. 51
II.3.1. Situation géographique. 51
II.3.2. Contextes géologique et pédologique. 51
II.3.3. Observations de terrain et description de profils. 52
II.3.4. Analyses granulométriques. 52
II.3.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. 53
II.3.6. Analyses chimiques. 54
II.4. La région de Rumonge. 55
II.4.1. Situation géographique. 55
II.4.2. Contextes géologique et pédologique. 55
II.4.3. Observations de terrain et description de profils. 56
II.4.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). 56
II.4.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. 57
II.4.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques). 58
II.5. La région de Nyanza-Lac. 59
II.5.1. Situation géographique. 59
II.5.2. Contextes géologique et pédologique. 59
II.5.3. Observations de terrain et description de profils. 59
II.5.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). 60
II.5.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. 61
II.5.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques). 62

CHAPITRE III: INTERPRETATION GEOLOGIQUE DES MATERIAUX ETUDIES: GENESE et CONCLUSIONS. 63

CHAPITRE IV: ASPECTS GEOTECHNIQUE, AGRICOLE et INDUSTRIEL DES MATERIAUX ETUDIES. 68

IV.1. Aspect géotechnique des matériaux smectitiques. 68

IV.2. Aspect agricole des matériaux smectitiques. 72

IV.3. Aspect industriel des matériaux smectitiques. 74

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

CHAPITRE I : DEFINITIONS ET GENERALITES.

I.1 DEFINITIONS.

I.1.1. "SMECTITE" et "ARGILE SMECTIQUE".

Le terme "**Smectite**" vient du grec "**SMEKTIKOS**" ("**qui nettoie**"). On le qualifie comme un produit de nettoyage du sol (Boudet, 1971), de part ses propriétés de forte absorption.

Les Smectites constituent un groupe de minéraux des argiles, de couleur très variable, qui, par leurs structure et compositions chimiques sont dotés de propriétés d'absorption et de gonflement.

On utilisera le terme "**argile smectique**", au lieu de "smectite", lorsque la partie minérale des formations hôtes (sols, altérations, sédiments, gisements hydrothermaux), contient seulement 50% de minéraux argileux du groupe des smectites.

I.1.2. "ARGILE".

Le terme "**argile**" se rencontre dans divers contextes, mais est interprété de manière différente. Ce que l'argile est pour le géologue ne l'est pas nécessairement pour l'agronome ni pour l'ingénieur du génie civil, ni pour l'industrie (papeterie, peinture,...), ni pour le céramiste.

Le mot vient du grec "**argilos**", dérivé de "**argos**" qui veut dire "**blanc**". Cette appellation semble résulter de la couleur blanche du kaolin, utilisé depuis des siècles en céramique pour la fabrication des porcelaines.

On note cependant une grande variation dans les couleurs des argiles depuis des termes blanchâtres jusqu'aux "**argiles noires**" (sombres) correspondant aux smectites formées sous climat tropical ("**argiles noires tropicales**").

Dans un travail de synthèse, Thorez (1986) définit les argiles et les minéraux argileux sous trois aspects:

I.1.2.1. Au sens géologique.

Les argles sont toutes des matériaux meubles produits par altération pédogénétique, météorique et/ou hydrothermale, contenus dans des sédiments fins non ou peu consolidés (roches argileuses). Ce matériel argileux représenterait 67% en volume de la lithosphère, alors que 70% de cette dernère

I.1.2.2. Au sens granulométrique.

Conformément à la tradition, cet aspect englobe tout matériel pédologique, géologique et minéralogique, caractérisé par des grains minéraux ou particules de **diamètre inférieur à deux microns** ($2\mu m$).

Cependant, cette limite n'est pas admise unanimément par tous les pays et par tous les chercheurs. En U.R.S.S par exemple, elle est abaissée à **0,5µm**. Ailleurs, la limite supérieure est soit **1µm**, soit **4µm** (pétroliers).

En pétrologie sédimentaire, toutes les particules dont le diamètre est compris entre **1µm** et **20µm** font partie des argiles, et cette fraction est communément considérée comme "**matière colloïdale**" (Wenworth, 1922). Il a été constaté qu'au-delà de la limite inférieure de 1µm, plusieurs propriétés de ces "micro-particules " (Yaalon, 1962) changent.

I.1.2.3. Au sens minéralogique.

Dans ce cas, l'accent est mis sur la **composition minéralogique** de la fraction granulométrique inférieure à 2µm. Cette fraction s'avère constituée de particules fines de phyllosilicates (muscovite, séricite, biotite, talc, pyrophyllite,...) , de minéraux argileux simples (illites, smectites, vermiculites, chlorites, kaolinites) et de toutes sortes de combinaisons entre ces derniers minéraux (sous forme de feuillets) pour former des interstratifiés (réguliers ou irréguliers), de silicates autres que les phyllosilicates (quartz, feldspaths, pyroxènes, amphiboles,...), de composés amorphes et organo-métalliques (de Fe, d'Al, de Si, de Mg,...), de composés purement organiques, de sulfates, de sels, de carbonates, de minéraux lourds,...

Les minéraux argileux sont communs, soit dans les roches argileuses, soit dans la fraction argileuse des sols.

I.1.2.4. Définition générale.

Thorez (1986) définit les argiles comme étant un ensemble de minéraux argileux appartenant à la famille des phyllosilicates à structure en couches tétraédriques et couches octaédriques.

L'association, plus ou moins perpendiculairement à l'axe cristallographique "c", de couches octaédriques et tétraédriques définit une structure bien précise, à la base de la classification des minéraux argileux. La variabilité dans la composition chimique permet de faire la distinction entre sous-groupes et/ou espèces minérales.

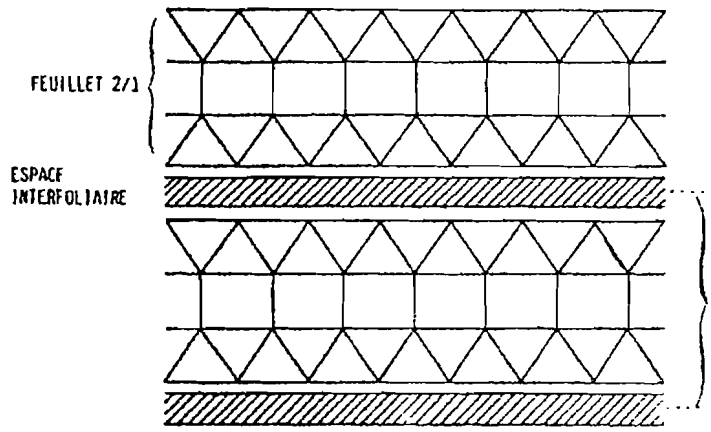


Fig.1: Représentation schématique d'une structure d'un minéral argileux et en regard la terminologie employée.

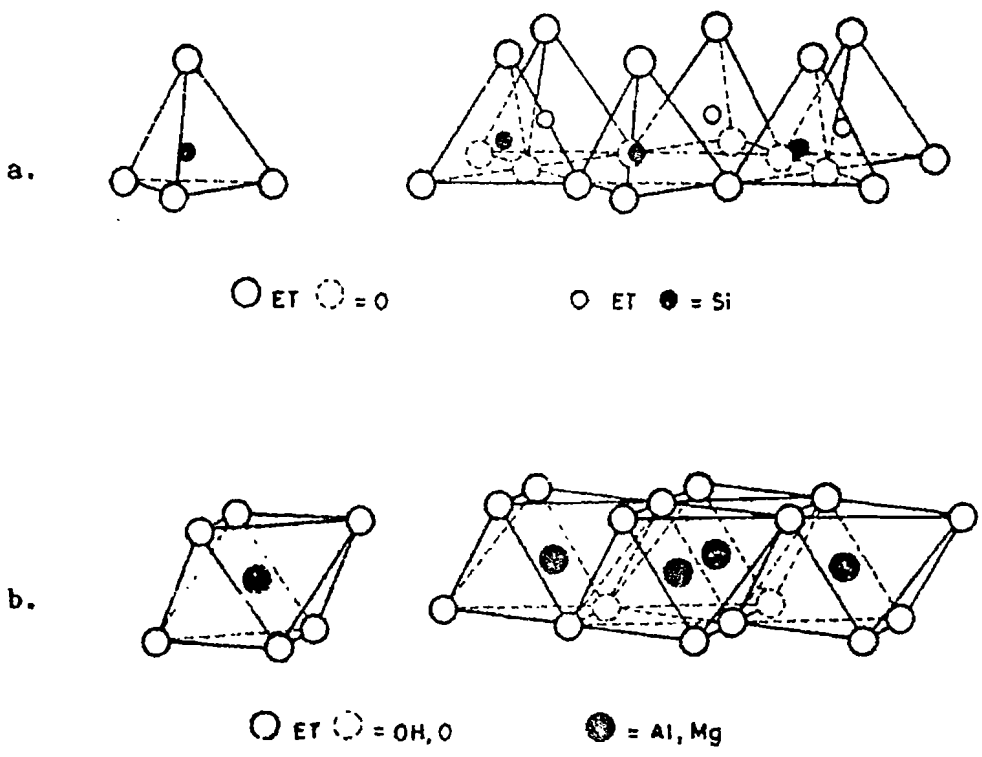


Fig.2: a. Couche tétraédrique avec tétraèdre de base
b. Couche octaédrique avec octaèdre de base

I.1.3. ASPECTS STRUCTURAUX DES MINERAUX ARGILEUX.

Le terme de "**structure**" signifie ici la disposition des atomes dans les cristaux d'argile.

Avant d'aborder les aspects structuraux des minéraux argileux (ou phyllosilicates argileux en général), quelques termes, accompagnés de schémas (fig. 1), méritent d'être rappelés.

Un feuillet (fig. 1): unité fondamentale des minéraux argileux, constituée par un empilement de plusieurs couches de deux types:

Couche tétraédrique (fig. 1; fig. 2A)

constituée de tétraèdres (fig. 2A) bâtis sur le Si comme atome central, coordiné à quatre atomes d'Oxygène. Ces tétraèdres ont un Oxygène libre et trois Oxygènes communs aux trois tétraèdres adjacents, de telle sorte que leurs bases forment un plan composé d'hexagones accolés et menageant au milieu une cavité dite hexagonale.

Couche octaèdrique (fig. 1 ; fig. 2B)

avec octaèdres (fig. 2B) bâtis sur deux cations trivalents ou trois cations bivalents.

La combinaison des couches tétraèdriques et octaèdriques se fait de deux manières:

Un feuillet à deux couches: Te-Oc ou 1/1 (fig. 3A)

Un feuillet à trois couches: Te-Oc-Te ou 2/1 (fig. 3B)

Entre deux feuillets successifs, dans l'espace interfoliaire (fig. 1), se trouvent des cations interfolaires. Le feuillet et l'espace interfoliaire constituent l'unité structurale dont l'épaisseur (dite épaisseur fondamentale) se mesure en Å le long de l'axe cristallographique "c". Cette épaisseur varie selon le type d'argile et le milieu dans lequel il se trouve (effet de l'eau ou de liquides organiques introduits pendant certaines expériences de laboratoire). Il peut en résulter une propriété de "**gonflement**" des argiles, en particulier pour le groupe des smectites, appelées pour ça "**argiles gonflantes**".

Ce gonflement, en présence d'eau et de liquides organiques, obéit à deux causes essentielles (Duchaufour, 1965):

1° Pour certains minéraux argileux (smectites et vermiculites), il y'a absorption d'eau entre les feuillets au niveau de l'espace interfoliaire.

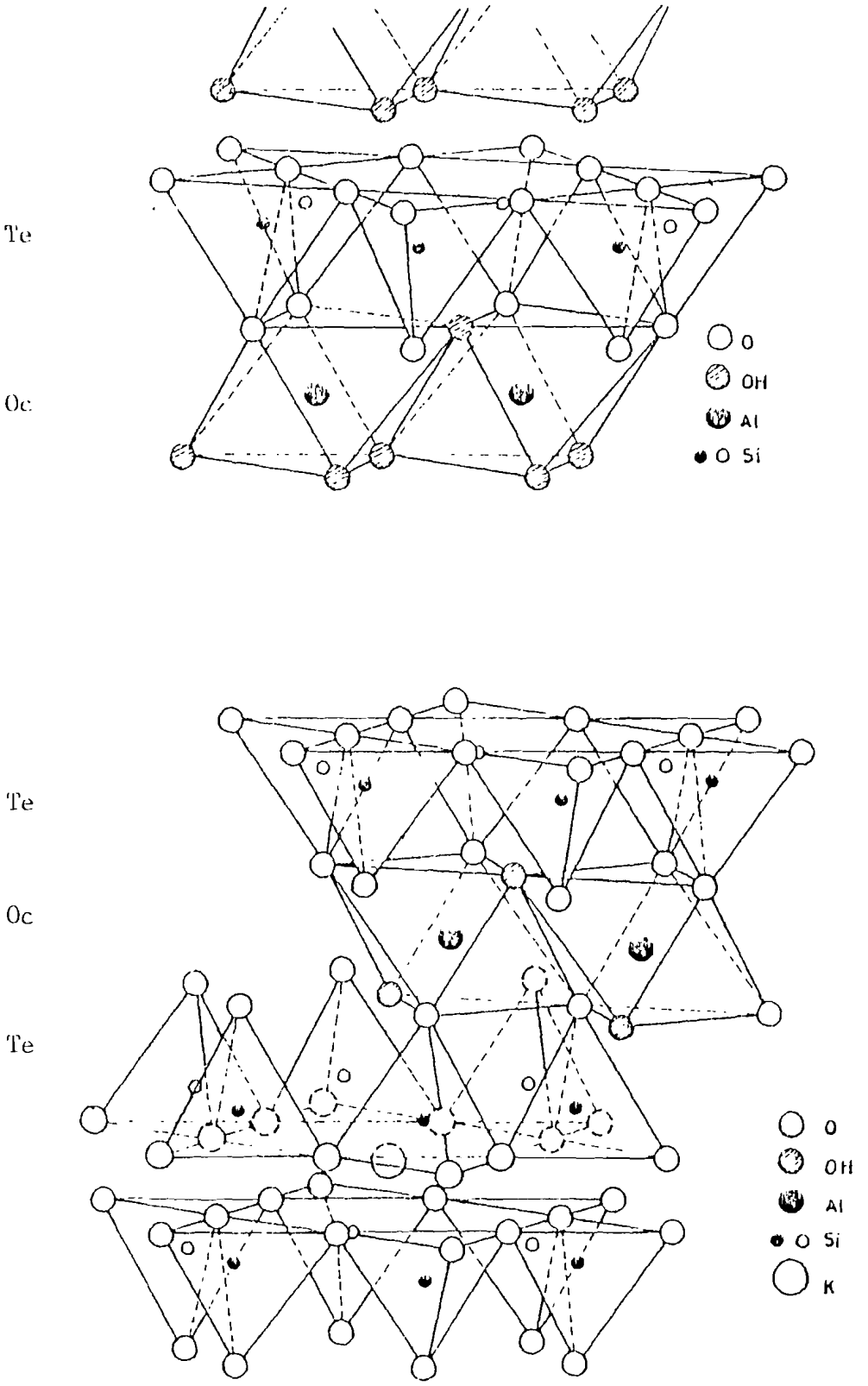


Fig.3: Assemblage de feuillets Te-Oc (kaolinite) et Te-Oc Te (mica)

2° Pour tous les minéraux argileux, même pour ceux dont l'espace fondamental est fixe (illite, kaolinite), il peut exister un gonflement lié à l'absorption d'eau (ou de liquides organiques) lorsque l'argile est à l'état dispersé.

Le gonflement affectant les argiles, se ventile entre deux types:

le gonflement interfoliaire (ou intraparticulaire), directement lié à la nature minéralogique;

le gonflement interparticulaire, lui, est peu tributaire de la nature minéralogique. C'est la taille et la morphologie des particules qui interviennent. Ce type de gonflement résulte de l'adsorption d'eau supplémentaire au sein de l'argile (eau de rétention et eau gravifique) provoquant l'écartement des particules les unes des autres (à différentes échelles).

L'ampleur des déficits saisonniers est responsable de l'intensité du gonflement. L'alternance cyclique humidité - sècheresse induit une alternance gonflement - tassement correspondante; les pressions de gonflement peuvent atteindre 0,2 à 0,5 Mpa (mégapascal), et l'ampleur des mouvements de 5 à 20 Cm (AID/csd_ 2164, 1971; Mouroux et al., 1988). Les bâtiments, canalisations et voiries sont rarement adaptés à de tels mouvements et sont affectés de dommages variables, pouvant entraîner la ruine des ouvrages.

Ce gonflement est relativement considérable pour les argiles sodiques (argiles-Na), et plus faible pour les argiles calciques (argiles-Ca). En effet, d'après Norrish et Raussel (1963) (repris par Caillère, Hénin et Rautureau, 1982), "le gonflement est inversément proportionnel à la racine carrée de la concentration et à la valence".

La caractéristique essentielle de ces argiles gonflantes, est de posséder entre les feuillets un certain nombre de couches d'eau, si bien que l'équidistance suivant (001) est essentiellement variable selon l'état d'hydratation ou de dessication.

Les substitutions éventuelles à l'intérieur des couches tétraédriques et/ou octaédriques, peuvent également modifier l'épaisseur fondamentale. Cette dernière constitue le critère fondamental de la classification des silicates argileux (tableau 1).

En particulier, la couche octaédrique, constituée par des atomes à six valences positives, est le siège de substitutions. Elle sera qualifiée de "dioctaédrique" si les cations sont trivalents et n'occupent que deux des trois sites disponibles. De même, la couche est dite "trioctaédrique" si les cations sont bivalents et occupent tous les trois sites disponibles.

Dans le cas de la dioctaédrie, les cations les plus fréquents sont surtout Al^{3+} et Fe^{3+}, tandis que dans la trioctaédrie, les cations sont surtout Mg^{2+}; Fe^{2+}; Zn^{2+}.

Selon le motif structural du feuillet, les argiles et les phyllosilicates sont classés dans deux catégories principales:

TABLEAU 1. CLASSIFICATION SCHEMATIQUE DES PHYLLOSILICATES ET DES MINERAUX ARGILEUX SIMPLES

TYPES DE FEUILLETS	CATIONS INTER-FOLIAIRES	CHARGE DU FEUILLET	d (001) EN Å	GROUPES	SOUS - GROUPES	ESPECES	SUBSTITUTIONS DANS COUCHE
1/1 Te-Oc	rien	0	7	Kaolinite - Serpentine	Di:Kaolonites	Kaolinite, Dickite, Nacrite, Halloysite	0
					Tri:Serpentines	Chrisotile, Lizardite Antigorite	0
			10	Kaolinite	Di:Kaolinite	Métahalloysite	
	rien	0	9.4-9.6	Pyrophyllite-Talc	Di:Pyrophyllite	Pyrophyllite	0
					Tri:Talc	Talc	0
	Cations Hydratés	0.25-0.6	≃ 14	Smectites	Di:Smectites (Montmorillonite)	Montmorillonite Beidellite, Nontronite	Octraédrique
					Tri:Saponite	Saponite Hectorite Sauconite	Tétraédrique Octaédrique Tétraédrique
2/1 Te-Oc-Te	Cation: non ou partiellement hydratés	0.6-0.6	≃ 14	Vermiculites	Di:Vermiculite	Vermiculite	Tétraédrique
					Tri:Vermiculite	Vermiculite	
		1	≃ 10	Micas	Di:Muscovite	Muscovite Paragonite	Tétraédrique
					Tri:Biotite	Biotite, Phlogopite	Tétraédrique
		2	9	Micas durs	Di:Margarite	Margarite Seybertite	
					Tri:Clintonite	Xantophyllite	
2/1/1	Couches d'Hydroxydes	Variable	≃ 14	Chlorites	Di:Sudoïte	Sudoïte Cookeïte	
					Di-Tri:Donbassite	Donbassite	Tétraédrique et Octaédrique

- minéraux 1/1, dont le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique supperposée.
- minéraux 2/1, dont le feuillet est formé de deux couches tétraédriques inserrant une couche octaédrique.

Dans cette dernière catégorie existent des minéraux 2/1 dont l'interfoliaire est occupé par "rien", par un cation sec, par un cation plus ou moins hydraté, ou par une couche (octaédrique) d'hydroxyde.

A côté des minéraux simples (illites, kaolinites, smectites, vermiculites, chlorites...), il existe encore une troisième famille de "phyllosilicates"(formés par empilement, ordonné ou désordonné, de feuillets de types différents): ce sont les "minéraux (ou édifices) interstratifés".

I.1.4. Définition, structure et classification des minéraux argileux du groupe des smectites .

Le terme "**smectites**" est généralement utilisé pour désigner l'ensemble des minéraux qui subissent par hydratation ou dessication, d'importantes variations de l'équidistance (ool), épaisseur du feuillet, variable entre 1O et 17 Å.

Dans la terminologie industrielle, on utilise le terme de " **bentonites**" pour désigner ces minéraux argileux gonflants. A l'origine, il s'agit d'une argile smectique à haut pouvoir décolorant et fortement thixotropique, provenant d'anciennes cendrées volcaniques transformées (par altération hydrothermale) de Fort Benton (Wyoming, U.S.A).

Parmi les smectites figure une espèce, la montmorillonite, dont la formule générale est: $Si_4O_{10}(Al_{2-x}R_x^{2+})(OH)_2CE_x.nH_2O$ où R^{2+} est constitué par le Mg. (C'est un minéral dont la localité-type est Montmorillon, Département de la Vienne, France).

La composition chimique théorique (sans les éléments interfoliaires) est:

SiO_2: 66,7%

Al_2O_3: 28,3%

H_2O: 5%

Les feuillets de ces minéraux avant toute substitution, ont sensiblement la même constitution que ceux de la pyrophyllite ($Si_4O_{10}Al_2(OH)_2$), à équidistance stable.

Quant à la structure du groupe des smectites, elle est voisine de celle des micas (fig. 3B). L'Al de l'octaèdre peut être remplacé partiellement par le Mg, d'où résulte un déficit de charge, compensé par l'introduction dans l'espace interfoliaire d'autres cations hydratés tels que Ca et/ou Na. Du fait que l'attraction entre les feuillets est plus faible que celle exercée dans les micas, les feuillets peuvent se séparer même au contact de l'eau, d'où l'état dispersé dans lequel peuvent se présenter ces

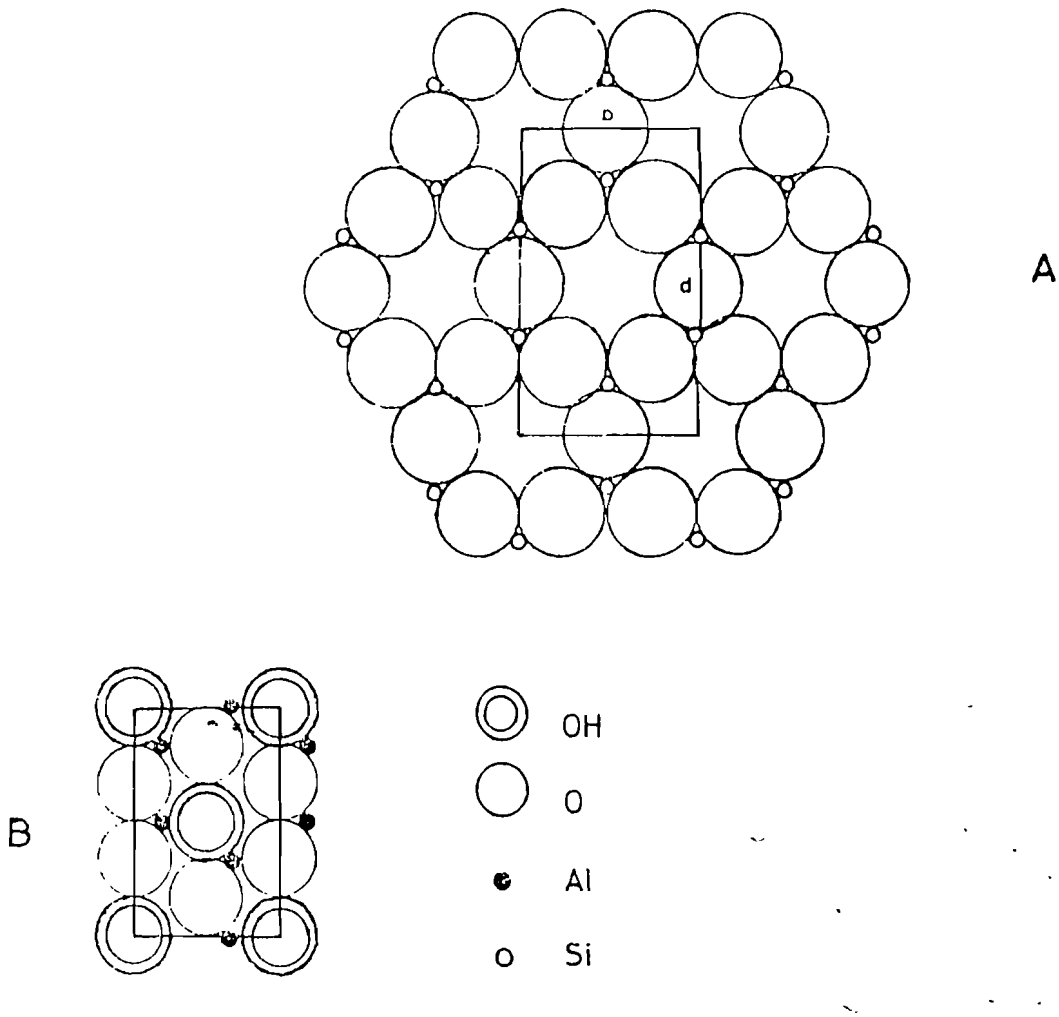


Fig 4: Contenu de la maille suivant les plans successifs des paramètres a et b ; A: plan hexagonal ; B : plan compact

minéraux argileux.

Par ailleurs, les cations de compensation en site interfoliaire, moins fixés que le K des micas, s'échangent avec d'autres cations, d'où la propriété de capacité d'échange cationique (C.E.C) très forte dans les smectites.

L'agencement structural des atomes dans les smectites correspond à un empilement de quatre plans atomiques d'Oxygène et d'hydroxyles:

Deux plans hexagonaux, constitués d'atomes d'Oxygène, disposés de façon à laisser des espaces hexagonaux bien accolés (fig. 4A).

Deux plans compacts formés d'atomes d'Oxygène et d'ions hydroxyles (fig. 4B).

Au niveau de la maille unitaire (unité fondamentale du cristal, pouvant, par translation dans l'espace à trois dimensions, engendrer la totalité du minéral) des smectites, les plans compacts comprennent chacun quatre atomes d'Oxygène et deux ions hydroxylés, tous liés à quatre atomes d'Al en position octaédrique. Ces plans sont pris en "sandwich" par deux plans hexagonaux contenant chacun six atomes d'Oxygène directement attachés à quatre atomes de Silicium.

On dispose donc de deux plans de cations tétraédriques et d'un plan de cations octaédriques. La substitution se fait selon la famille du minéral:

Soit dans la couche octaédrique entre des éléments divalents et trivalents. le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations échangeables (CE_X).

Ex: famille de la montmorillonite: $Si_4O_{10}(Al_{2-X}R_X^{2+})(OH)_2CE_X.nH_2O$

Soit dans la couche tétraédrique entre le Silicium et l' Aluminium. Le déficit de charge est saturé par des cations dits de compensation dont le rayon ionique est tel qu'ils se logent exactement dans les cavités hexagonales superficielles délimitées par l'agencement des tétraèdres des deux couches tétraédriques accolées (cavités situées à la surface du feuillet).

Ex: famille de la saponite: $Si_{4-X}Al_XO_{10}R_3^{2+}(OH)_2CE_X$

Tableau 2: Eléments par maille, exprimés plan par plan.

Cations de compensation éventuels ou cations échangeables.	(K)	<---- dans cavités hexagonales superficielles et/ou dans espace interfoliaire.
Couche tétraédrique.	6 O (4 - X)Si; XAl; 4O; 2OH.	<--- plan de cations tétraédriques.
Couche octaédrique.	(4 - X)Al; XR^{2+}ou XR^{3+}	<--- plan de cations octaédriques (R^{2+} pour les dioctaédriques et R^{3+} pour les trioctaédriques.
Couche tétraédrique.	4O; 2OH (4 - X)Si; XAl 6O	<--- plan de cations tétraédriques

En définitive, la formule cristallographique générale pour le groupe des smectites est: $(Si_{8-X}XAl)O_{20}(Al_{(4-X)}R_X^{2+}(ouR^{3+}))(OH)_4CE_X.nH_2O$ pour la maille entière.

Les n molécules d'eau sont logées dans les espaces interfoliaires. Elles se fixent aux faces chargées des minéraux argileux (charges accidentelles ou inhérentes). C'est ce mécanisme qui est à la base de la forte rétention de l'eau par les argiles à haute succion (résultat de l'intéraction des charges des argiles avec les molécules polaires de l'eau adsorbée).

Ce nombre n, et par conséquent l'écartement entre les feuillets, dépend du cation échangeable fixé (Bourgignon).

Na.....: 12,5 Å.....1 couche H_2O

Ca.....: 15,5 Å.....2 couches H_2O

Les minéraux du groupe des smectites peuvent se présenter sous différents faciès: feuillets avec des bords enroulés (cas fréquent pour les montmorillonites), lattes (pour les nontronites et l'hectolite), fibres, plaquettes minces, parfois plus ou moins plissées, baguettes ou agrégats avec des couleurs et des teintes variables. Ces faciès sont surtout observables au microscope électronique, soit par transmission (M.E.T.), soit par balayage (M.E.B.).

Les paramètres cristallographiques de la maille (pour la montmorillonite, et de façon générale pour l'ensemble des smectites) dépendent de la nature des cations octaédriques (Brindley, 1980;

Besson, 1980, repris par Caillère, Hénin, et Rautureau, 1982). Ils sont voisins de:

$a_0 = 5{,}18$ Å

$b_0 = 8{,}95$ Å

Tableau 3: Quelques paramètres cristallographiques des minéraux du groupe des smectites.

	a_0	b_0
Montmorillonite.	5,18Ä	8,95Ä
Béidellite.	5,18Ä	8,95Ä
Hectolite.	5,25Ä	9,05Ä
Saponite.	5,30Ä	9,20Ä

c_0: varie avec les conditions d'hydratation.

Parmi les smectites, les distinctions sont nombreuses. On a, selon le type de cation en substitution octaédrique:

* dans les minéraux dioctaédriques:

Montmorillonite (Mg^{2+});

Béidellite et ses variétés. (substitution tétraédrique; pas de substitution en couches octaédriques);

Nontronite (Fe). (substitutions tétra-et octaédrique)

Volchonskite

** parmi les minéraux trioctaédriques, on cite:

Hectolite (Li);

Stévensite;

Saponite (Mg);

Bowlingite (Fe);

Sauconite (Zn);

Pimélite (Ni).

Il y'a continuité dans la série montmorillonite-béidellite d'une part et, d'autre part, dans celle de la saponite-stévensite.

Les autres minéraux argileux, différents du groupe des smectites, les phyllosilicates dont la structure est presque identique à celle des argiles, les argiles fibreuses et les interstratifiés, sont décrits dans de nombreux travaux (Thorez, 1986; Caillère et al., 1982). Ces minéraux ne font pas partie de ce travail.

Signalons toutefois la famille des palygorskites (= attapulgites), dont la formule générale (pour la demi-maille) est: $Si_8Mg_5O_{20}(OH)_2.4H_2O$. Ce sont des minéraux argileux fibreux, caractérisés par leurs couches octaédriques discontinues. Ils se présentent en bandes parallèles, avec d(001) égale à 10Å qui les différencie des sépiolites dont d(001) est égale à 12Å. Ils sont trouvés dans des formations récentes ou actuelles des milieux riches en cations, tels les lagunes, les lacs et les sols des régions désertiques. Ils sont souvent associés à des smectites (Caillère, Hénin et Rautureau, 1982). Ce sont donc des argiles d'origine sédimentaire. Cette conclusion rejoint celle de Berton et Leberre (1983) qui attribuent l'origine des attapulgites à la néoformation en milieu lagunaire. On trouve également les palygorskites dans des gîtes hydrothermaux comme minéraux d'altération (Caillère, Hénin, Rautureau, 1982).

I.1.5. Aspects chimiques des minéraux argileux du groupe des smectites.

Les minéraux du groupe des smectites répondent aux formules chimiques suivantes (Bourgignon):

Montmorillonite (sens strict): $(Al_{2-X}Mg)Si_4O_{10}(OH)_2CE_X.nH_2O$

Béidellite: $Al_2(Si_{4-X}Al_X)O_{10}(OH)_2CE_X$

Nontronite: $(Fe^{3+},Al)_2(Si_{4-X}Al_X)O_{10}(OH)_2CE_X$

Volchonskite (Cr): variété chromifère de Béidellite.

Hectolite (le plus riche en Mg, sans Al): $(Mg_{3-X}Li_X)Si_4O_{10}(OH,F)_2CE_X$

Stévensite: $(Mg_{4-X}R_X^+)Si_4O_{10}(OH)_2CE_X$

Bowlingite: substitution de Mg par $Fe^{2+} \vee Fe^{3+}$

Saponite: $R_3^{2+}Si_{4-X}Al_XO_{10}(OH)_2CE_X$

Sauconite: $Zn_3Si_4O_{10}(OH)_2$

Pimélite: substitution de Mg par Ni.

CE_X = cations échangeables, exprimés en milliéquivalents.

Tableau 6: Composition chimique moyenne de quelques minéraux du groupe des Smectites (Bourguignon).

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	H_2O^-	H_2O^+
Montmorillonite	50	20	2	4	-	-	-	3	13
Nontronite	42	6	25	-	-	-	-	12	5
Hectolite	54	-	6	25	-	-	3	9	5
Saponite	45	-	-	25	-	-	-	12	6

---: trace ou nul.

La structure et la chimie des minéraux du goupe des smectites, expliquent en grande partie la grande instabilité de leurs feuillets.

Dans ces minéraux, les substitutions, en particulier dans les octaèdres entre des cations bivalents et trivalents, et/ou dans les tétraèdres entre Si et Al, sont fréquentes. Des cations échangeables tels que Ca et Na, assurent la liaison entre les feuillets.

Cette liaison entre deux feuillets successifs, dans le cas des smectites, est si faible qu'elle se brise sous la simple action de l'eau. La liaison est d'autant plus instable que les contacts sont moins étroits. Ceci est bien en accord avec les minéraux du groupe des smectites dont la distance entre les feuillets varie de 12 à 17Å.

I.1.6. Conclusion.

La stucture et la chimie des minéraux argileux, en particulier ceux du groupe des smectites, sont responsables de leurs propriétés.

C'est ainsi que les propriétés d'adsorption s'expliquent par les grandes surfaces de contact que possèdent les particules de petite taille (I.1.2.2).

Le gonflement au contact de l'eau ou de liquides organiques, est attribué à l'instabilité de la structure (I.1.5). La capacité d'échange cationique (C.E.C) élevée est non seulement liée à la chimie, mais aussi à la structure (grande distance entre les feuillets). La plasticité est liée à la forme lamellaire (Atterberg, 1913; Le Chatelier, 1914), à la finesse des particules (Bourguignon), ainsi qu'à la composition chimique (Verdeyen et al., 1968). Quant à la rétention de l'eau par ces minéraux argileux, elle est due à leurs charges électriques en plus des possibilités d'écartement de leurs feuillets.

Une classification purement "statique" des argiles basée uniquement sur la structure et la chimie,

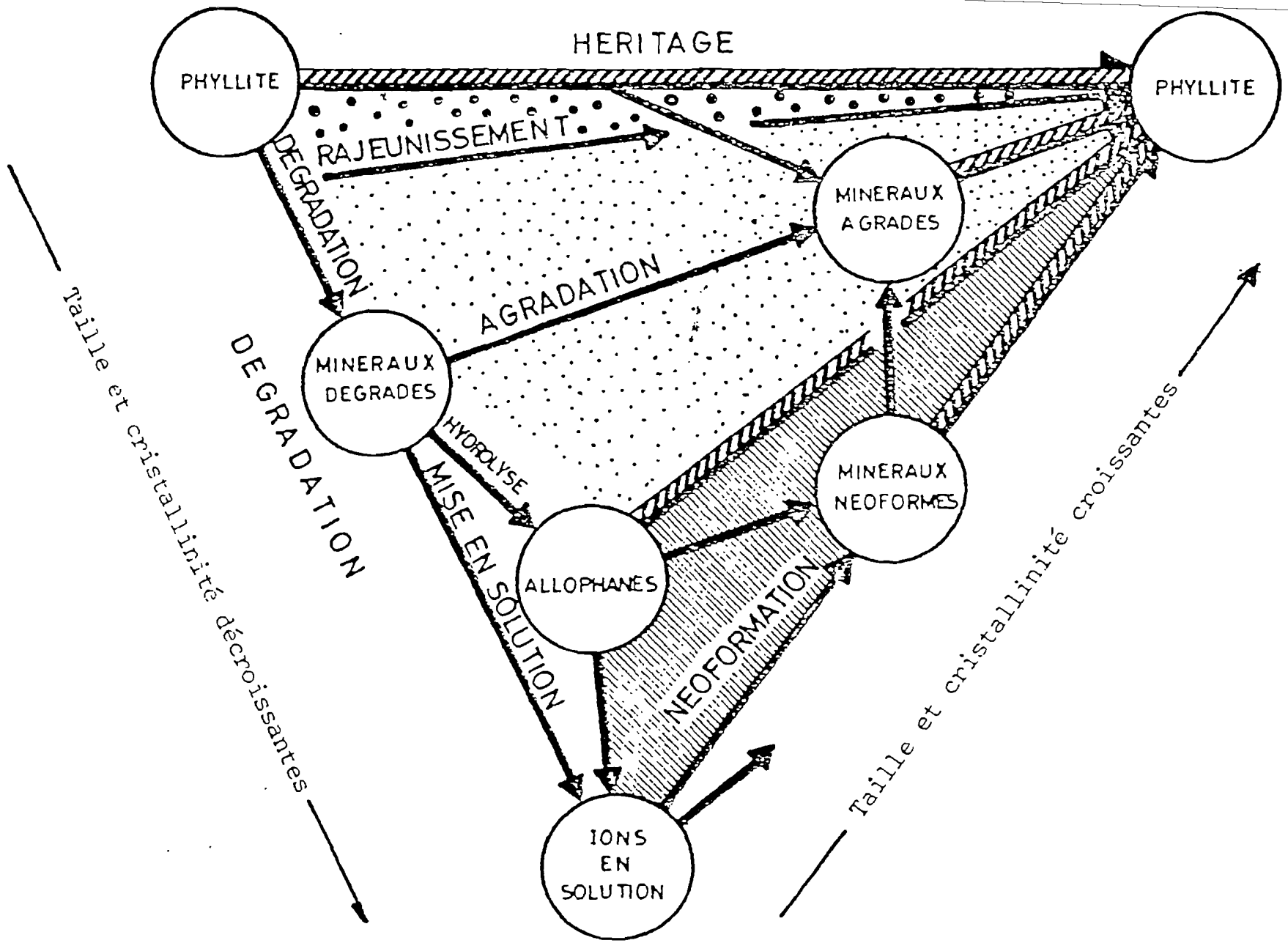


Fig. 5 .- Schéma d'évolution (d'après Lucas 1963, modifié).

est insuffisante, car elle ne rend pas compte de la "dynamique" des minéraux argileux qui est liée intimément à leur genèse. C'est ainsi par exemple que les argiles des sols ont des origines très différentes suivant les types de sols. Il importe donc de donner une classification des argiles qui tienne compte du milieu pédogénétique, du mode et des conditions de formation des argiles.

I.1.7. Classification "écologique" des argiles et définition des "vertisols" et "sols vertiques".

Millot (1964), (repris par Matthieux, 1983) a donné les définitions fondamentales suivantes:

L'**héritage** concerne les argiles provenant directement des phyllosilicates du matériau parental, qui n'ont subi que de faibles transformations (conditions climatiques peu excessives). Il s'agit d'une accumulation des minéraux de l'amont, qui se sont déposés dans un bassin après transport.

La **dégradation** se définit par une transformation plus ou moins profonde, se traduisant par une diminution du degré de cristallinité, la perte progressive de certains constituants, et une diminution concurrente de la taille des particules.

L'**agradation**, au contraire, résulte de l'addition d'éléments à un réseau mal cristallisé, en reconstituant plus ou moins fidèlement une stucture bien cristallisée, semblable à celle du minéral argileux parental.

Les argiles formées par dégradation ou agradation, sont dites "**argiles transformées**" par substitution d'ions.

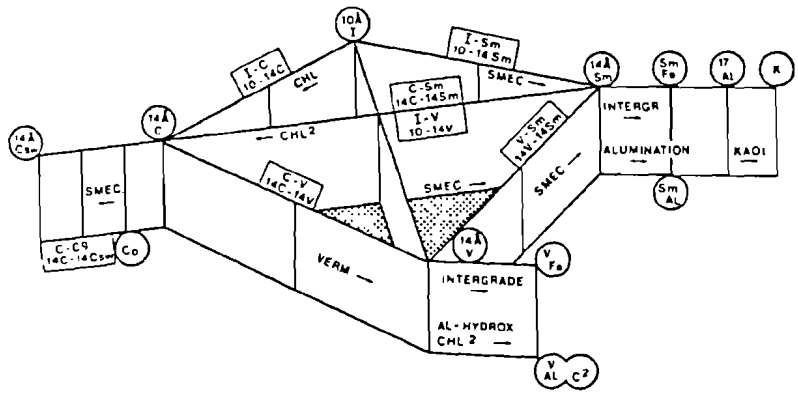
Par exemple: transformation de l'illite en **smectite** dite **de transformation** (Sm_T).

La "transformation" (des argiles) est un terme général qui reprend les mécanismes d'évolution des minéraux argileux en fonction de la dynamique du milieu. Ces minéraux argileux sont en perpetuelle mutation: on les appelle "**des mutants**" (Thorez, 1989).

Les séquences de dégradation ou d'agradation peuvent être rassemblées dans un bloc-diagramme (fig. **6**) (Thorez, 1985) qui permet de visualiser les relations pouvant faire transiter un minéral argileux vers un autre au cours d'une "évolution".

Les interstratifiés engendrés par dégradation à partir de minéraux simples, peuvent, suite à une saturation artificielle au K^+ ou au Mg^{2+} reconstituer par agradation les minéraux dont ils sont issus, grâce à leurs "mémoires" structurales.

La **néoformation** provient de la (ré)organisation en réseau cristallin, des constituants en solution, provenant de certains minéraux parentaux, libérés à la suite d'une hydrolyse plus ou moins brutale de ces derniers. Il en résulte une formation d'un minéral par recristallisation à partir des ions en solution.



SIMPLE CLAY MINERALS I C V Sm

MIXED LAYERED MINERALS (LETTER-LETTER)

MIXED LAYERED STRUCTURES (DIFFER-DIFFER)

Co OPEN CHLORITE

PATHWAYS

SMEC	SMECTITIZATION
VERM	VERMICULITIZATION
CHL	CHLORITIZATION
CHL²	SECONDARY CHLORITIZATION
KAOL	KAOLINIZATION

Fig. 6 Diagramme block presentation for the various possibilities of (simplified) weathering sequences for a 10Å (muscovite, biotite, illite) and a 14Å (chlorite) parent clay minerals, and corresponding geochemical pathways.

Figure 6 : Bloc diagramme représentant les séquences de dégradation simplifiées à partir de minéraux parentaux illitiques et chloritiques

Les argiles de néoformation caractérisent essentiellement des climats chauds qui, seuls, favorisent l'hydrolyse totale des minéraux primitifs. Cette néoformation est pilotée par les alternances de saisons très contrastées: phases d'humectation accentuée (une certaine hydromorphie), puis phase de dessication qui favorisent la transformation des gels en réseaux cristallins (Matthieu, 1983).

Certaines smectites (montmorillonites, nontronites entre autres) naissent au cours de la néoformation, au départ d'une restructuration foliaire des ions disponibles en solution, soit dans le sol, soit dans le bassin de sédimentation, soit encore en contexte hydrothermal (liaison avec les minéralisations comme c'est le cas des nontronites dans les fumours noirs des rides médio-océaniques sub-actuels à actuels).

Par opposition aux smectites dites de transformation (Sm_T), les smectites de néoformation sont notées: Sm_N .

La nature de la néoformation dépend de la qualité du drainage et de la quantité des précipitations: sous climat pluvieux et avec un bon drainage, c'est la kaolinite qui se néoforme au départ d'un réarrangement des ions Si et Al disponibles dans le milieu. Sous climat relativement sec et en milieu confiné, c'est la smectite qui se néoforme (Pédro, 1968, repris par Mosser, 1980)

La fig. 6 résume les possibilités d'ittineraire des minéraux argileux dans leur milieu.

Les alternances saisonnières marquées du pédoclimat, associées à un milieu confiné et riche en cations basiques (Ca; Mg), sont deux facteurs en relation avec la présence de minéraux des smectites dans un sol (Duchaufour, 1965, Lozet et Matthieu, 1986).

Les smectites en liaison intime avec une quantité d'humus très polymérisé, caractérisent une classe de sols lourds, argileux, de couleur sombre (noirâtre en général), appelés "**vertisols**" et caractéristiques des climats chauds (Duchaufour, 1965).

Sous climat tropical, les vertisols s'identifient étroitement aux argiles gonflantes et sont connus sous différentes appellations:

"**Argiles noires tropicales d'Afrique**";

"**Régurs des Indes**" (ou "**terres à coton des Indes**").

Sous climat sub-tropical, ce sont les "**Tirs méditerranéens**".

Sous climat très continental, certains sols noirs du Sud-Est Européen, appelés des "**Smonitza**", font partie de la classe des vertisols.

Fig.7 – 8:: cartes de distribution des vertisols dans le monde (fig. 7) et en Afrique (fig. 8).

Leurs surfaces de distribution sont majoritairement localisées en Afrique, en Asie (Inde surtout) et en Australie.

Les vertisols se développent dans des dépressions mal drainées (position topographique déprimée associée à une hydromorphie temporaire) correspondant à ce qu'on appelle des "**bassins en-**

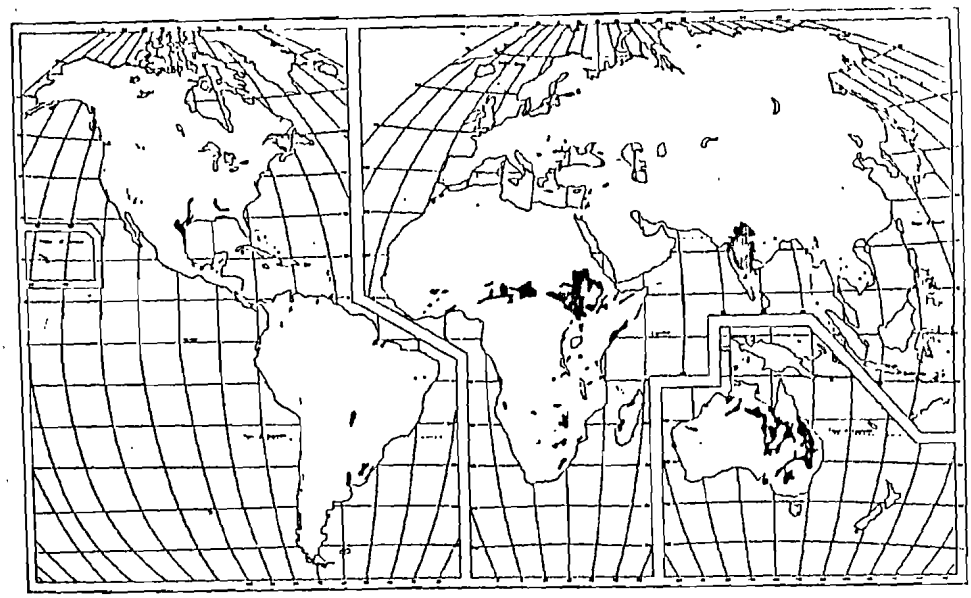


Figure 7: Dark clay soils of tropical and subtropical regions: areas of major distribution (Dudal, 1965).

Figure 1 shows the distribùtion of Vertisols and vertic soils in the African continent. Sudan, Ethiopia, Chad, Nigeria, Somalia, Zimbabwe are some of the countries which have a large proportion of their land in the Vertisol and vertic soils group. Table 1 lists some of the countries reported to have Vertisols and vertic subgroups by climatic regions. This is based on the information furnished by the participants of the IBSRAM workshop (IBSRAM, 1985) and the FAO report (FAO, 1965). The data are generalized and need review and updating.

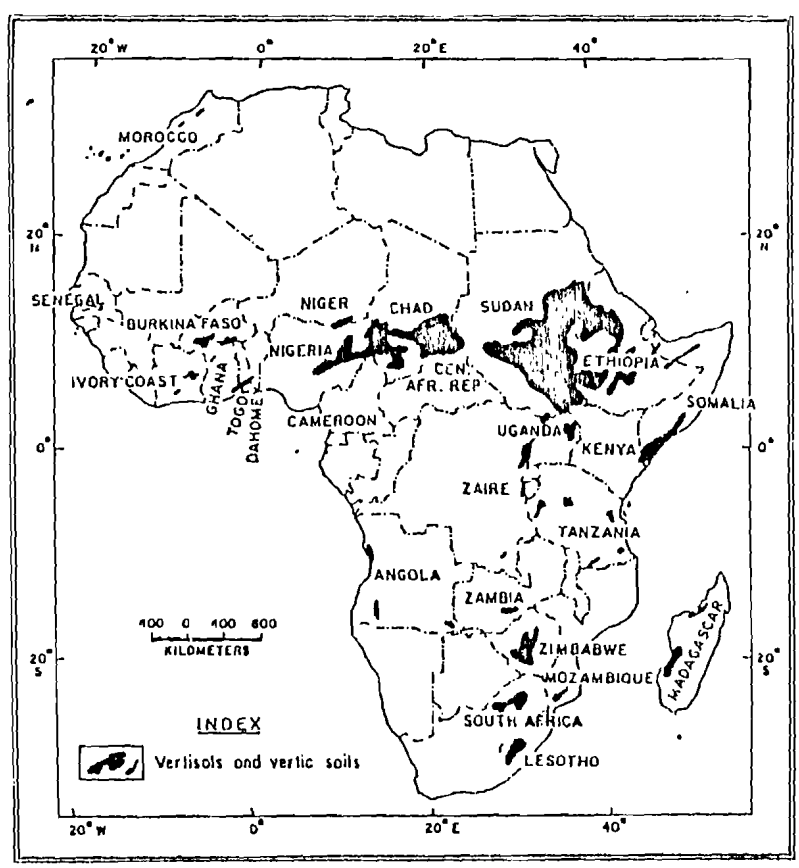


Fig. 8 : Areas of major distribution of Vertisols and vertic soils in tropical and subtropical AF...
(FAO 1965)

doréiques", et/ou sur roche-mère riche en bases, où la néosynthèse des smectites et leur conservation sont favorisées.

Caractérisation des vertisols (Duchaufour, 1965):

Morphologiquement, sols à profils AC (peu évolués), homogénéisés par des mouvements internes qui s'expriment par des facettes (ou miroirs de glissement), connues sous le nom de "slickensides", et d'un micro-relief de type gilgaï (1). L'étymologie du terme ("**vertere**" en latin, signifiant "**tourner**") est liée à ces mouvements internes, dûs aux argiles gonflantes et les conditions locales dans les sols. Ces mouvements limitent la différenciation des horizons. La pression, dans ces sols, s'exerce en tous sens, mais le sol peut essentiellement se mouvoir horizontalement et verticalement. Il en résulte un déplacement selon une composante oblique, à l'origine des slickensides, des gilgaïs et des structures en coin (Frankart, 1987);

Ils présentent de larges fentes de dessication (larges et profondes) à certaines périodes de l'année, et une structure polyédrique à prismatique grossière.

Leurs régimes d'humidité, couleurs, richesse en bases échangeables, pourcentage en $CaCO_3$, profondeur du contact lithique, sont variables;

Leur pourcentage en C, en argile, en C.E.C (Capacité d'Echange Cationque) est variable avec la profondeur;

La morphologie de la fraction argileuse est souvent dominée par les smectites. Cependant, cette fraction est aussi fréquemment caractérisée par une association minéralogique complexe, souvent influencée par la nature minéralogique des bassins versants où l'on peut identifier, outre la kaolinite et l'illite, des interstratifiés et même de l'halloysite. Les minéraux carbonatés (Ca; Ca et Mg), d'origine primaire ou secondaire, sont communs; leur abondance et leur nature sont variables (filaments, mycélium, nodules friables ou non, accumulations friables ou indurées);

Le régime de température mésique à isohyperthermique, le plus souvent thermique ou plus chaud;

Ils présentent une très grande variation de structure des horizons de surface: grumeleuse à massive et très plastique en saisons pluvieuses, tandis que très compacte en périodes sèches;

Ils se développent généralement sur des pentes faibles, mais parfois fortes. Dans ce dernier cas, ces sols s'érodent aisément (érosion en nappe, creeping, gulies).

Les pédons et les polypédons sont généralement larges;

---

(1) gilgaï: micro-relief (centimétrique à métrique) typique des sols argileux qui ont un *co*-efficient d'expansion important lorsque la teneur en eau change. Il s'agit d'une succession de micro-bassins clos et de micro-buttes couvrant une surface pratiquement horizontale, ou de micro-vallées et micro-crêtes alignées le long d'une pente (Lozet et Matthieu, 1986).

La végétation caractéristique est graminéenne, savanicole, forestère;

Ils sont aptes à l'agriculture mécanisée si contrôle de l'alimentation en eau. Le rétrécissement, la fissuration, le glissement dans ces sols, en font des sols instables qui posent de sérieux problèmes quant à leur utilisation agro-géotechnique: on les appelle souvent des "**sols à problèmes**".

Dans les facteurs qui influencent la génèse des vertisols, nous citerons (Frankart, 1987):

Les modifications du régime d'humidité.

Dans les régions arides, ces sols se sont développés principalement dans les dépressions (bassins endoréiques) occasionnellement inondées, ou dans des matériaux à texture fine. Dans d'autres régions, les changements des régimes d'humidité sont principalement induits par le bilan évaporation-précipitation.

Les matériaux parentaux: ils sont principalement de deux types:

Les matériaux sédimentaires (alluvions fluviales, lacustres, marines ou les marnes).

Les matériaux consolidés: roches sédimentaires (calcaires, schistes); roches éruptives, métamorphiques en général, basiques (basaltes, gabbros, diabases, norites, serpentines); matériaux volcaniques.

La classification française décrit les vertisols en deux sous-classes (classification à contenu génétique, axée sur la géomorphologie et la géochimie) (Duchaufour, 1976; Lozet et matthieu, 1986):

Les vertisols à drainage externe nul ou réduit, formés en zones planes ou déprimées (bassins endoréiques): ce sont ce qu'on appelle les "**vertisols topomorhes**" (formés à partir de matériaux en provenance des zones hautes dans la topographie). Ce sont, d'après Nguyen Kha, 1973 (repris par Duchaufour, 1976), des "sols à argiles néoformées".

Les vertisols à drainage externe possible, développés sur pentes plus ou moins prononcées: ce sont les **vertisols** dits **lithomorphes**, associés à des matériaux parentaux riches en bases (en général au départ d'une roche magmatique basique).

Certains sols noirs des dépressions mal drainées du Sud de l'Ukraine, contiennent toutefois, jusqu'à 50% d'argile résultant d'une néoformation sur place (Rods et Yarilova, 1960, repris par Duchaufour, 1976). Il est donc difficile de maintenir la distinction entre les deux groupes de sols noirs d'après leur origine lithomorphe ou topomorphe. En réalité, les deux facteurs sont intimément liés et peuvent difficilement être séparés, comme le remarque Maignien (1961) (repris par Duchaufour, 1976): "Les intermédiaires sont en effet fréquents". Ces derniers correspondent aux vertisols dits topolithomorphes, à la génèse desquels contribuent les deux processus. Frankart (1987) confirme cette dernière considération.

Nous opposerons les "**sols vertiques**" aux "**vertisols**" (sensus stricto) (Duchaufour, 1976):

Les premiers - sont moins évolués que les seconds.
- n'ont qu'une partie des caractères vertiques, ceux qui s'acquièrent le plus rapidement: caractères de structure surtout (fentes de retrait, slickensides).

- sont caractérisés par une matière organique dont la maturation et la polymérisation caractéristiques des vertisols, ne sont pas encore acquises.

- les argiles ne sont pas constituées exclusivement de smectites vraies, mais peuvent comporter une notable proportion d'interstratifiés semi-gonflants, parfois même de la kaolinite en climat chaud, et/ou des illites (micas).

I.2. INTERET DU SUJET.

L'intérêt présenté par l'étude des smectites (argiles gonflantes) est en étroite dépendance avec leurs propriétés physiques et chimiques.

Le présent travail contribue toutefois essentiellement à l'étude systématique et fondamentale des argiles du Burundi, entamée depuis quelques années par le Département des Sciences de la Terre de l'Université du Burundi (l'aspect appliqué n'est présenté que sommairement en complément à cette étude).

I.2.1. Domaines d'application des smectites.

I.2.1.1. En technologie.

Le groupe des smectites a des propriétés absorbantes très remarquables qui les font rechercher par l'industrie (dégraissants, saponifiants, liants, plastifiants, émulsifs, décolorants,...).

Les suspensions "smectites-huiles" qui constituent un système biphasé, présentent un comportement qui en fait des lubrifiants, appréciés dans certaines circonstances où ils remplacent avantageusement les systèmes "huiles-graphite" (Caillère, Hénin et Rautureau, 1982) pour les filières de la machine.

Par leurs propriétés gonflantes, rhéologiques et fortement thixotropiques (par simple agitation mécanique ou suite à une augmentation de pression), ces argiles peuvent passer, d'une manière réversible, de leur état de plasticité à l'état liquide, d'où le terme technologique de "terres à foulon"

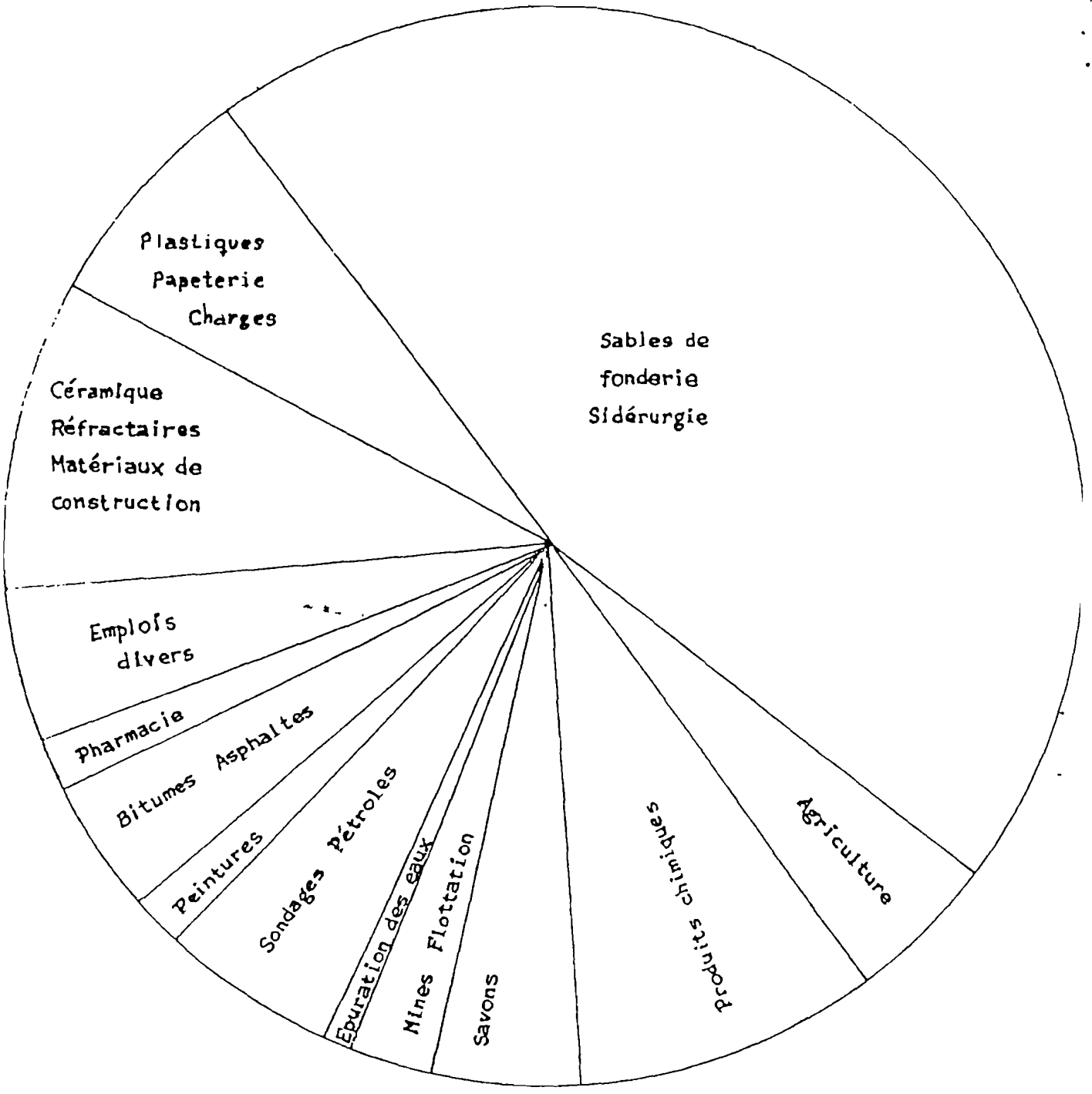


Fig. 9. - Répartition de la consommation de Bentonite en 1950. (Déribéré et Esme 1951).

pour désigner ces argiles smectitiques, du fait qu'elles peuvent être "foulées" et devenir fluides. Elles peuvent ainsi être utilisées autant de fois que l'on voudra, sans que leurs propriétés soient modifiées, pourvu que l'eau utilisée pour le gonflement soit bien pure, et que, lors du séchage, la température (qui influence sur le gonflement) ne soit pas trop élevée (Déribéré et Esme, 1951).

En terme commercial (économique), on appelle "bentonite" cette argile smectitique (I.1.4). Sous sa forme brute naturelle, la bentonite est une roche tendre, ayant à peu près la consistance du kaolin (c'est-à-dire friable, onctueuse, happant à la langue,...). Les poudres commerciales sont obtenues par broyage et par classement par ventilation, éventuellement par levigation, voire même par mise en gel alcalin (Déribéré et Esme, 1951).

Des mêmes auteurs, pour qu'une argile soit vraiment une bentonite au sens commercial du terme (pour de bonnes qualités commerciales), elle doit gonfler au moins de cinq fois son volume. Normalement, on observe, pour les bonnes bentonites, des gonflements de dix à vingt fois. Des valeurs de douze à quinze fois, sont les plus générales.

La réalisation en laboratoire des essais de gonflement, se fait toujours en ajoutant la bentonite à l'eau et non l'inverse; sinon, dès que l'eau vient au contact de la bentonite, il y'a absorption rapide par une couche extérieure qui se gélifie rapidement et devient imperméable, ce qui interrompt le phénomène (Déribéré et Esme, 1951).

L'utilisation industrielle de ces argiles smectitiques, diffère même suivant le type de cation interfoliaire (Bourguignon).

Sur le plan technologique, les utilisations diverses des bentonites sont les suivantes (fig. 9).

a) Produits céramiques, réfractaires et matériaux de construction.

Une des premières applications connues de la bentonite, fut la confection des pâtes comme matière de l'industrie céramique (comme plastifiant). Son utilisation revêt une importance considérable sur la plasticité des matériaux céramiques qu'elle augmente beaucoup. C'est donc un renforçateur de la plasticité et un liant pour les autres argiles (facilite le modelage, accroît la résistance, la tenacité et la solidité après séchage et cuisson) (Déribéré et Esme, 1951). Les mêmes auteurs font remarquer que la bentonite permet aussi d'économiser du combustible de cuisson, et que son emploi dans l'industrie céramique donne des produits céramiques et réfractaires moins poreux, sensiblement plus homogènes, d'un meilleur son, avec une nette diminution de la tendance aux creuvassements.

Par ailleurs, ces auteurs signalent le fait que la déshydratation de la bentonite se faisant de façon pratiquement continue, et que les dernières parties d'eau ne sont expulsées qu'à plus de 800°C, cela est intéressant, dans la mesure où le kaolin, se décomposant à 430°C (c'est-à-dire, avant que le

produit céramique ne se ramollisse), la bentonite conserve l'eau d'hydratation jusqu'à la température de ramollissement de la masse.

Dans la briqueterie, la bentonite est utilisée comme matériau de construction, avec profit d'augmenter la densité des briques sans en augmenter proportionnellement le poids. Divers essais pour cette fin ont été faits en Angleterre (Crawford, 1936, repris par Déribéré et Esme, 1951).

Dans les ciments, bétons, plâtres, l'introduction de la bentonite a un effet plastifiant et homogénéisateur très marqué et intéressant (Déribéré et Esme, 1951).

b) Dans les sables de moulage et de fonderie.

L'introduction de la bentonite dans la composition des sables de moulage et de fonderie, leur donne une excellente cohésion (par son pouvoir liant) et une plus grande perméabilité aux gaz (par sa propriété d'absorption).

Les essais ont été faits sur une bentonite américaine et sur une bentonite italienne (Prever et Balma, 1937, repris par Déribéré etEsme, 1951).

c) Utilisation de la bentonite pour l'épuration et la clarification des eaux présentant une certaine turbidité.

La bentonite est ici employée comme **coagulant.**

La technique de clarification des eaux par des coagulants naturels, date de longtemps. Son origine se situe dans les régions du Nord-Est de l'Afrique (Soudan - Egypte) où la seule source d'eau permanente est le Nil, charriant des eaux limoneuses.

Actuellement, il est connu que certains produits extraits de végétaux, peuvent clarifier l'eau trouble en un court laps de temps, jusqu'à lui donner l'aspect d'une eau potable. Ces produits ont la propriété de floculer (former des ponts entre les colloïdes par l'action des polymères, ioniques ou non) ou de coaguler (neutraliser la charge superficielle négative des particules colloïdes par adjonction d'un électrolyte minéral) rapidement les matières colloïdales en suspension et, par augmentation du volume et du poids, ces dernières peuvent se décanter plus ou moins rapidement. C'est le cas nottamment des graines broyées du Moringa Oleifera (floculant) (Kaeser et al.,1987, repris par Nkurikiye, 1989).

La bentonite joue également le même rôle (coagulant). On compte sur les propriétés colloïdales de l'argile et sur la formation, par les électrolytes de l'eau, à son contact, de floculants qui sédimenteront (Déribéré et Esme, 1951). Les détails sur le raisonnement scientifique à la base de cette

technique, ainsi que le mode d' exécution des essais, sont développés par Kaeser et al., 1987 (repris par Nkurikiye, 1989).

Les essais pour cette fin ont été effectués, comparativement sur diverses eaux naturelles, avec la bentonite américaine, la bentonite italienne et le sulfate d'alumine. Ils montrent que 125 mgrs de bentonite (tant américaine qu'italienne) par litre d'eau, suffisent pour obtenir en six heures une bonne clarification complète (sans flocons résiduaires en suspension), tandis que, pour obtenir le même effet avec le sulfate d'alumine, il faut au moins 200 mgrs de ce dernier (Déribéré et Esme, 1951).

Cette technique, très simple, intéressante pour le monde rural du Burundi, devient d'un intérêt sans égal pour les populations des régions de la plaine de l'Imbo, à occurrence de ces argiles (I.5) et où le besoin en eau claire se remarque au simple passage dans cette région. En plus, elle est adaptée aux moyens des populations à faibles revenus.

La nécessité de discuter de "méthodes appropriées de traitement de l'eau dans le milieu rural" est confirmée, au Burundi, par les séminaires qui ont été consacrés à ce sujet par les Départements du Génie Civil et de Géographie, respectivement de la Faculté des Sciences Appliquées et de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université du Burundi, en dates respectives du 04 Juillet 1988 et du 14 au 18 Mai 1991.

d) Dans l'industrie du caoutchouc.

La bentonite, comme matière pour l'industrie du caoutchouc, puise son intérêt dans le pouvoir absorbant et émulsif, et surtout dans la finesse de ses particules et dans sa propriété de thixotropie (Cornic, 1941, repris par Déribéré et Esme, 1951). La technique de l'emploi de la bentonite dans le caoutchouc, est développée par Déribéré et Esme (1951). Demême, dans le finissage de surface des objets en caoutchouc, la bentonite a donné d'excellents résultats (Déribéré et Esme, 1951).

e) Dans la papeterie.

La bentonite, comme argile colloïdale, intervient dans la fabrication du papier au niveau de plusieurs couches:

-- bentonite de charge (avec une rétention meilleure que celle du kaolin ordinaire) (Wells, 1923, repris par Déribéré et Esme, 1951).

-- bentonite pour supprimer les encrassements par les résines:

Les résines du bois et des pâtes, difficiles à éliminer complètement, se transforment en goudrons

et provoquent un trouble et un encrassement des tables et organes.

L'application de la bentonite pour réaliser la stabilisation de ces résines, a été étudiée en détail dès 1924 par Wells (1924) (repris par Déribéré et Esme, 1951). La technique d'introduction de la bentonite dans les pâtes de bois, est décrite par ces derniers auteurs.

-- bentonite de stabilisation et homogénéisation des couleurs et pigments:

La bentonite, sous forme de gel, absorbe les colorants. Pour la confection de papiers colorés, son emploi est spécialement indiqué.

-- suspensions de bentonite pour support de couchage.

-- bentonite pour l'incorporation aux papiers, des produits auxiliaires d'imperméabilisation: ces derniers sont d'abord stabilisés sous forme d'émulsion, avec un gel de bentonite ou dans une suspension de bentonite.

f) Dans les savons et détersifs.

La bentonite constitue une charge pour les savons, d'autant plus intéressante qu' elle peut participer elle-même, soit par son pouvoir émulsif, soit par son affinité pour les particules carbonnées, à l'effet détersif. les normes exigées peuvent aller jusqu'à des concentrations de 40% de bentonite dans les savons, ce qui,tout en donnant un bon produit, conduit à une évidente et sensible économie (Déribéré et Esme, 1951). Une littérature abondante (Malowan, 1937; Glenn, 1938; Consin, 1938; Hirschmann et Bechtner, 1938; Weymann, 1938; Ktz, 1939, repris par Déribéré et Esme, 1951) et de multiples brevêts (E.P.162.691; E.P. 197.012; B.Canad.253.764; U.S.A.P.1.544.588; 1.574; 733; etc.) ont mentionné les différentes modalités d'emploi de la bentonite en savonnerie.

Les savons bentonitiques se distinguent par de précieux avantages que Gruber, 1940, (repris par Déribéré et Esme, 1951) a fort bien résumé comme suit:

1 Grand pouvoir émulsionnant et action détersive due à la suspension visqueuse du gel de bentonite inclus;
2 Faculté de se disperser dans l'eau plus rapidement que les autres savons, du fait de l'état colloïdal de l'argile incluse;
3 Formation d'une mousse abondante et légère;
4 Propriété de permettre à la solution de ce savon thixotrope de bien pénétrer les fibres et d'absorber les impuretés incluses, nottamment celles des charges électro-positives;

5 Propriétés d'échanges de bases, exerçant un pouvoir adoucissant vis-à-vis des eaux dures, corrigeant l'excès d'alcali libre du savon, en réalisant un effet auto-protecteur vis-à-vis des tissus;
6 Propriétés émulsives, saponification plus rapide et intégrale des matières grasses (savons mi-cuits, savons mous), mise en suspension stable des substances insaponifiables;

7 Séchage au vieillissement beaucoup moindre que pour les autres savons et bonne stabilité après obtention rapide de l'équilibre d'eau;
8 Peu sensible à la déformation et ramollissement faible dans l'eau chaude;
9 Réduction considérable des matières grasses utilisées à la préparation.

Bien entendu, ces divers points ne sont réellement acquis que par une bonne fabrication et par l'emploi de vraies bentonites.

g) Bentonite dans l'industrie des produits d'entretien.

Les propriétés gélifiantes, émulsifiantes et liantes de la bentonite, ainsi que son pouvoir de dispersion élevé et son haut pouvoir absorbant en font une matière première de grande intérêt pour l'industrie des produits d'entretien.

Nous signalerons, à titre d'exemple, quelques applications faites en ce domaine: les encoustiques, les cirages (le blanc pour chaussures), de bonnes pâtes à pôlir etc. Ceux-ci, émulsifiés avec la bentonite, présentent d'appréciables avantages (économie importante en corps gras et en cires). Les produits finis, s'ils ont été préparés avec le soin voulu, c'est-à-dire avec une bonne émulsification, sont très stables et très homogènes. A l'usage, ceux-ci sont très économiques.

h) Dans la préparation des insecticides et fongicides.

Un insecticide ou un fongicide doit s'étendre uniformément, bien adhérer, et, lorsqu'il s'agit d'émulsions, celles-ci doivent rester stables. Pour réaliser un tel ensemble de qualités, il est généralement nécessaire d'ajouter des agents supports aux toxiques habituels.

On connaît le rôle du talc dans la préparation classique de nombreux fongicides ou insecticides: grâce à sa structure en écaille, le talc peut, en effet, jouer un excellent rôle d'adhésif. La bentonite possède aussi cette structure, avec des écailles infiniment plus petites.

Par ailleurs, la bentonite aide grandement dans le pouvoir de suspension des liquides et maintient

un ensemble homogène, depuis la préparation jusqu'à la fin de l'action utile du produit déposé.

La bentonite peut jouer par elle-même, et grâce à la finesse de ses particules, un certain rôle fongicide, en constituant une pellicule capable d'étouffer les parasites.

i) Dans la recherche d'hydrocarbures et boues d'injection.

La bentonite est employée comme **lubrifiant** dans les perforations de roches et de terres renfermant des grains durs et des sables.

Dans les recherches de pétroles (et autres hydrocarbures liquides, gazeux ou mixtes), la bentonite forme une couche imperméable au-dessus de l'organe perforateur. Elle empêche ainsi la sortie des gaz et liquides de ce côté.

D'autre part, son **pouvoir plastifiant, amalgamant** et **adsorbant,** permet d'extraire des carottes d'où les matières liquides et gazeuses ne sont même pas partiellement éliminées.

Dans les sondages, la bentonite a trouvé un large emploi en assurant la remontée extérieure des matériaux. Des gels de bentonite constituent ici un liquide d'injection spécialement intéressant.

I.2.1.2. En géologie.

L'étude des smectites, en particulier la géochimie de leurs cations interchangeables, présente un grand intérêt, aussi bien pour le milieu générateur du sédiment qui les contient que pour l'environnement physico-chimique qui existait lors du dépôt sédimentaire.

I.2.1.3. En agrologie.

Les argiles noires sont de loin les sols les plus fertiles des régions tropales; elles sont riches au point de vue minéral et bien pourvues en eau. En saison des pluies, elles présentent cependant un défaut d'aération (hydromorphie) qui limite leur fertilité (sols à potentiel économique important mais difficiles à manipuler).

Ces sols sont favorables à la culture du coton ("**black cotton soils**" dans la classification américaine).

I.2.1.4. En géotechnique.

Il ne s'agit pas ici d'usage mais de réaction de sols, due aux argiles gonflantes incorporées. Ces

sols présentent alors de sérieux problèmes géotechniques vis-à-vis de la construction.

La mécanique des sols à argiles gonflantes, varie selon la nature de la garniture cationique de ces derniers (Bourguignon). Les géotechniciens doivent modifier le comportement du sol préalablement à l'édification de tout ouvrage d'art sur ce dernier.

Conclusion.

Toutes les bentonites ne sont pas aptes à tous les usages sommairement passés en revue. Leurs qualités individuelles les orientent vers telle ou telle utilisation. Cette sélectivité d'usage n'est due qu'à la composition minéralogique et à la nature des ions échangeables des smectites.

I.2.2. Travaux antérieurs.

Les smectites du Burundi ont fait l'objet de travaux disparates, parfois à caractère préliminaire seulement.

Les vertisols, caractérisés par la présence d'argiles du groupe des smectites, ont fait l'objet de nombreux travaux pédo-agronomiques à l'initiative du Ministère de l'Agriculture du Burundi (en particulier par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi, ISABU), ainsi que de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université du Burundi. Ces travaux ont essentiellement porté sur la cartographie des vertisols et sur leur productivité et potentialité agronomique. Les questions en rapport avec leur génèse n'ont pas fait de travaux approfondis, ce qui peut expliquer le peu d'informations disponibles pour caractériser, par les méthodes de laboratoire, la nature précise des minéraux gonflants. Les propriétés technologiques ont intéressé le Ministère de l'Energie et des Mines du Burundi, en particulier en ce qui concerne la possibilité d'améliorer la plasticité du kaolin burundais, dans la perspective d'une éventuelle implantation d'usine de céramique, avec l'aide de la coopération chinoise. C'est ainsi qu'un programme de prospection préliminaire et d'échantillonnage des smectites, a été effectué, à la demande de la Direction Générale de la Géologie, par G. Chartry.

Au sein de l'Université du Burundi, les dégâts provoqués à certaines constructions de la ville de Bujumbura par la présence d'argiles gonflantes dans les sols correspondants, ont retenu l'attention des Départements du Génie Civil (*Prof*^{rs}. Müller et Diel, Faculté des Sciences Appliquées) et des Sciences de la Terre (*Prof*. Nzojibwami, Faculté des Sciences).

Enfin, ce dernier Département a montré son intérêt pour l'étude fondamentale des argiles, en y consacrant un cours (Prof. Thorez) au niveau des enseignements de la licence.

Par ailleurs, un premier travail systématique sur le kaolin du Burundi, y fut réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'études (Nkurikiye, 1989). La présente étude des smectites constitue ainsi une suite logique et complémentaire des travaux systématiques entamés sur l'étude des argiles du Burundi.

Sur le plan de la détermination précise par la diffraction des Rayons-X, les smectites du Burundi ont fait l'objet d'une étude dans le cadre d'une thèse de doctorat [Goemaere, 1991; Laboratoire de Géologie et Minéralogie des Argiles (Prof. Thorez), Université de Liège].

I.2.3. Justification du choix du sujet et plan du travail.

D'après ce qui précède, il s'avère donc intéressant de procéder à un inventaire des smectites du Burundi, visant à la connaissance de leurs caractères physico-chimiques fondamentaux.

Le présent travail se fixe ainsi comme objectif de développer, après le premier chapitre qui traite des définitions et des généralités:

- la caractérisation des matériaux étudiés (chap. II);
- leurs conditions de génèse (chap. III);
- leurs aspects géothechnique, agricole et industriel (chap. IV).

I.3. GENESE DES SMECTITES.

La littérature abonde d'exemples où les transformations minéralogiques et leurs mécanismes qui génèrent les smectites, ont été décrits. Ces argiles résultent de la dégradation ou de la néoformation à partir d'autres minéraux (I.1.7) lors des phénomènes sédimentaires ou pédogénétiques.

D'après Mosser (1980), les smectites, avec le kaolin, sont les minéraux argileux stables sous les climats tropical et équatorial.

Les roches-mères, quelle que soit leur nature pétrographique (roche magmatique acide, intermédiaire, basique, ultrabasique ou sédiments), pourvu qu' elles contiennent quelques minéraux primaires pourvoyeurs en SiO_2, Al_2O_3, MgO et Fe_2O_3, fournissent indifféremment des smectites lorsque le milieu est confinant, avec un p^H basique et un climat relativement chaud et sec. Cette conclusion rejoint celle de nombreux auteurs dont Millot (1964), repris par Caillère, Hénin et Rautureau (1982).

Selon Paquet (1969), repris par Mosser (1980), "plus la roche-mère est basique et riche en minéraux ferromagnésiens, plus la smectite formée dans les vertisols, est riche en Fer. Les profils développés sur roches sédimentaires, sont caractérisés par des montmorillonites. Par contre, dans la catégorie

des roches-mères cristallines et cristallophylliennes, les vertisols se caractérisent par des béidellites ferrifères-nontronites, tendant de plus en plus vers la nontronite au fur et à mesure que la basicité de la roche augmente".

Dans le paysage, ces argiles gonflantes occupent les zones déprimées, bassins de réception des apports par les eaux de ruissellement, avec un drainage entravé ou nul, dans les régions à pédoclimat humides saisonnièrement. Ces argiles, "**topomorphes**", sont formées sur des séries sédimentaires (smectites héritées du matériau d'origine allochtone), par opposition à celles qui sont néoformées à partir de roches magmatiques ou cristallophylliennes basiques en place (smectites "**litho-morphes**"). Cependant, il est difficile de maintenir la distinction entre les deux groupes (I.1.7).

Les hypothèses concernant la génèse des smectites se confirment par diverses observations (sur terrain et au microscope) et par des essais de synthèse et d'altération en laboratoire. Ces dernières, en particulier, mettent en évidence les facteurs intervenant dans la formation des smectites.

I.3.1. Dégradation des micas.

Le schéma général de l'altération des micas dans les sols, est représenté selon la séquence de Jackson (1964):

Illite
Biotite ------> Vermiculite ------> Smectite ----> Minéraux argileux gonflants
Muscovite pédogénétiques intergrades (18Ä).

	Kaolinite, Halloysite	----->	Gibbsite

Chlorite	---->	Chlorite secondaire	----->	Intergrades pédogénétiques	----->	Chlorite-Al.

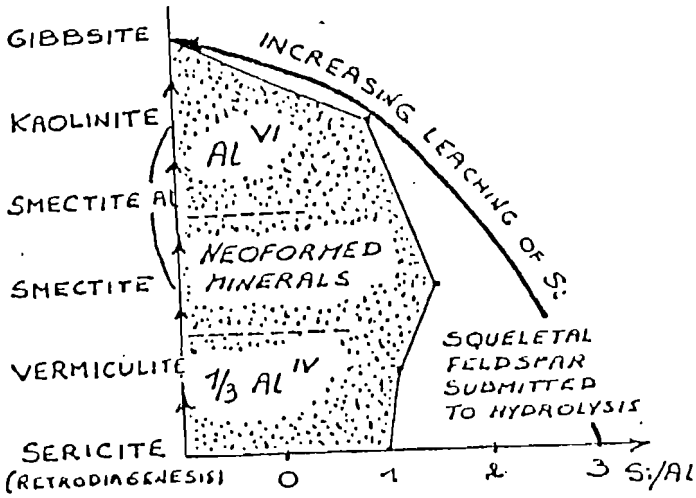
Le passage d'un stade à l'autre se fait par des étapes intermédiaires qui sont généralement des argiles interstratifiées.

Ces transformations sont connues sous les termes de "**dégradation-agradation**" (Thorez, 1986);

U. R

Fig. 10: WEATHERING OF [illegible]

VARIATIONS OF THE Si/Al RATIO WITHIN NEOFORMED CLAY MINERALS GENERATED AFTER FELDSPARS (TARDY, 1969)



FELDSPAR

REPRESENTATIVE SEQUENCE AT THE LAYER LEVEL

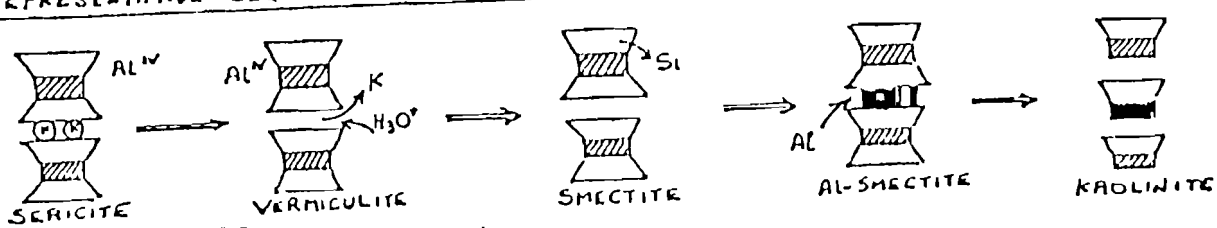
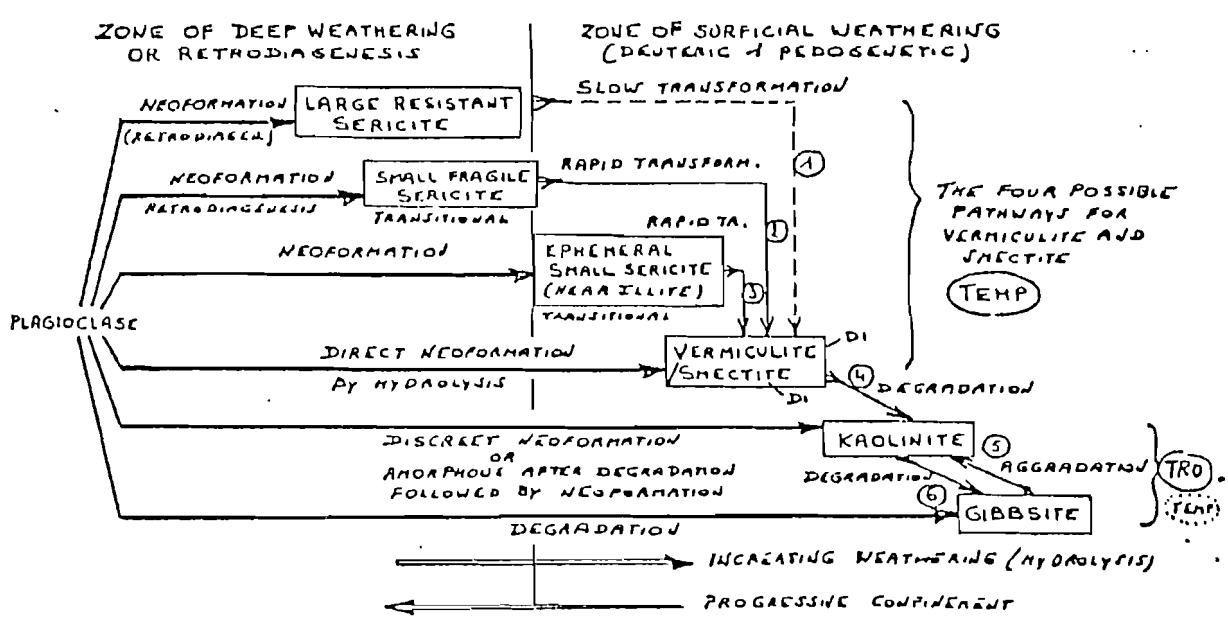


Fig. 11: SCHEMATIC EVOLUTION OF PLAGIOCLASE WEATHERING IN TEMPERATE CLIMATE (TEMP) AND TROPICAL CLIMATE (TRO) (MEILHAC & TARDY, 1970 - MODIFIED)



leurs mécanismes sont complexes.

Les micas, à structure phylliteuse originelle, donnent des smectites par simple transformation (substitution des cations et ouverture des feuillets).

I.3.2. Néoformation des smectites dans les feldspaths en voie d'altération.

L'altération des feldspaths en smectites a déjà été réalisée de nombreuses fois par voie expérimentale (Norton, 1939, 1941; Koizuni et Roy, 1959, repris par Mosser, 1980).

Exemples de synthèses par voie expérimentale:

$$Si_{3,67}Al_{0,33}O_{10}Al_2(OH)_2Al(OH)_{20,33}$$

(par Roy et Osborne, 1954);

$$Si_{3,78}Al_{0,28}Al_2O_{10}(OH)_2Al_{0,22}Ca_{0,78+2,6}H_2O$$

(Trichet, 1969).

(smectites à Aluminium interfoliaire).

Dans la nature, les smectites issues des feldspaths sont décrites par Tomlinson et Meier (1937), Craig et Loughnan (1964), Rex et Martin (1966).

Le schéma habituellement adopté pour les smectites et vermiculites trouvées à l'intérieur des feldspaths altérés, est le suivant:

feldspaths ------> séricite ------> vermiculite ------> smectites.

Les feldspaths, n'ayant pas une structure phylliteuse, donnent des smectites par dissolution des charpentes silicatées et néoformation in situ. La figure 10 montre les variations du rapport Si/Al dans les minéraux argileux néoformés à partir des feldspaths. Le schéma de l'évolution dans l'altération de ces tectosilicates est présenté dans la figure 11.

Ces réactions, dans la nature, dépendent de cinq facteurs importants, à savoir la lithologie (matériaux parentaux), la climatologie, la topographie (conditions de drainage), la biologie (conditionnant le p^H et Eh du milieu) et la chronologie (durée du phénomène).

Les deux voies, à savoir la transformation des édifices micacés et la néoformation (à partir des feldspaths) peuvent converger vers le même résultat (formation des smectites) en équilibre avec les conditons du milieu.

I.3.3. Altération hydrothermale.

Les smectites peuvent être formées par **altération "hydrothermale"** ou **"volcanique"**. C'est d'ailleurs la voie normale de formation des "bentonites" (I.1.4). Les principaux gisements de ces dernières en exploitation, sont généralement issus de la transformation en place de cendres volcaniques vitreuses, en milieu aqueux. Mais, certains gisements de bentonites se sont également formés par altération hydrothermale de roches volcaniques, liée aux fluides résiduels d'une phase magmatique en fin de cristallisation (Berton et Le Berre, 1983).

L'altération rapide des verres volcaniques en milieu aqueux, conduit à une néoformation de smectite plus ou moins ferrifère (nontronite des basaltes océaniques) à très bien cristallisée (gisement de bentonite à vocation commerciale) (Thorez, comm. pers.).

I.4. LE MILIEU PHYSIQUE DES SMECTITES AU BURUNDI.

I.4.1. Situation géographique.

La plaine côtière du Lac Tanganyika au Burundi, couplée à celle de la rive orientale de la Rusizi, constituent la région naturelle de l'"Imbo" (fig. 12). Cette dernière comprend l'Imbo-Nord (portion septentrionale de la plaine de la Rusizi) et l'Imbo-centre (comprenant la région de Bujumbura) jusque dans la région de Nyanza-Lac).

Cette région appartient à la branche occidentale du Grand Rift Est-Africain et, est comprise, au Burundi, entre $2^0 42'$ de latitude Sud (frontière rwandaise) et $4^0 20'$ de latitude Sud (frontière tanzanienne). Elle constitue la côte orientale du Lac Tanganyika.

I.4.2. Cadre géologique et géomorphologique général.

La plaine de l'Imbo a fait l'objet de diverses études géologiques récentes (Ilunga, 1984; Chorowicz et Thouin, 1985; Le Fournier et al., 1985).

L'évolution morphotectonique de cette portion de la région des Grands-Lacs du Rift, comporte une tectonique d'effondrement en gradins (failles normales) et de coulissage (failles de décrochement). Cette tectonique est à l'origine de bassins linéaires jalonnés de lacs et de foyers d'activité volcanique dans la région des Grands-Lacs.

Ces bassins sont dominés par des contreforts précambriens dont le caractère très accidenté du relief, est en rapport avec un ravinement profond par des cours d'eau. Ces derniers, prenant naissance dans les contreforts, sont en relation avec une érosion qui rajeunit le relief aux abords du Rift, et alimentent ce dernier en dépôts fluviatils et lacustres.

Mode de formation du Rift (Delvaux, 1991).

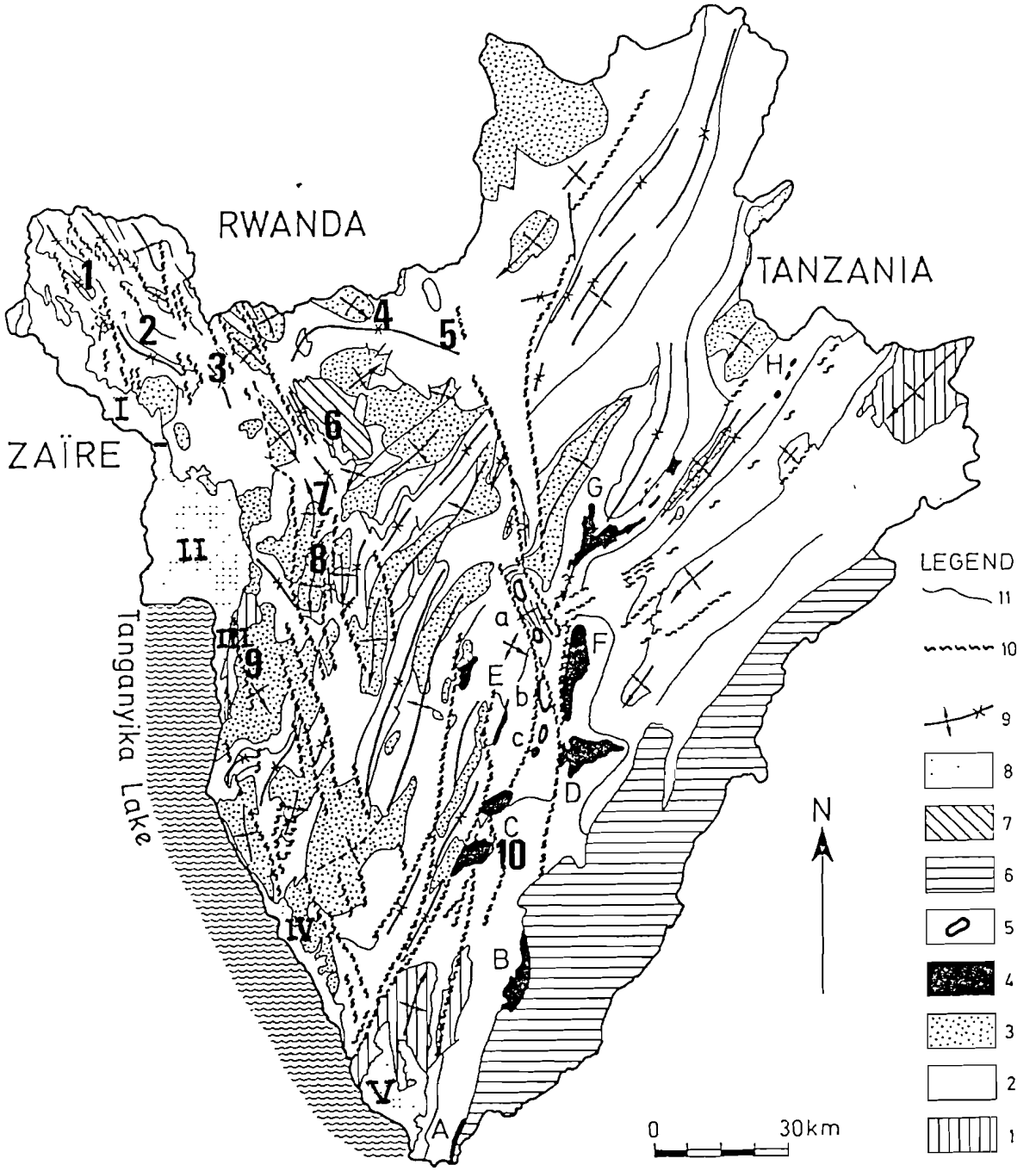
Les premiers mouvements de surrection et de subsidence pourraient dater du Carbonifère (Karoo, ± 325 m.a).

Au début du Terciaire (65 m.a) se situe la fracturation de l'écorce terrestre, depuis le Taurus (en Asie Mineure) par le fossé du Jourdain, la Mer Rouge, l'Ethiopie, les zones des Grands-Lacs jusqu'au détroit du Mozambique.

Les mouvements tectoniques plus amples, combinant un relèvement généralisé des bordures et un affaissement simultané du fond du graben, reprirent au courant du Néogène (26 m.a.) jusqu'au

Fig. 1 C . Grandes unités géologiques et localisation des sites étudiés.

1. Archaean; 2. Burundian metasediments; 3. Kibaran granitoids;
4. Mafic and ultramafic intrusions; 5. Late Kibaran alkaline intrusions;



6. Malagarasian (Upper Proterozoic); 7.Upper Ruvubu alkaline plutonic complex; 8. Cainozoic; 9. Principal axes of upright folding (D2); 10. Principal Late Kibaran shear zones (D'2); 11. Stratigraphic limits and structural trends. Abbreviations refer to the location of the massifs. a. Gitega; b. Makebuko; c. Bukirasazi; A. Mugina; B. Nyange-Songa; C. Rutovu; D. Musongati; E. Waga; F. Mukanda-Buhoro; G. Nyabikere; H. Muremera (after Tack et al., 1990).

I. : **Imbo-Nord; II: Imbo-Centre; III: Bujumbura.**
IV: Rumonge; V: Nyanza-Lac.

Pléistocène Supérieur (10.000 y B.P.). La configuration actuelle du graben est due à ces nouveaux effondrements.

A la fin du Pléistocène (10.000 y B.P.), le Lac Tanganyika se déverse dans le bassin du Zaïre par l'exuctoire Lukuga. Il s'en suivit un abaissement du niveau du Lac, et par là-même, l'exondation de la majeure partie de la plaine de la Rusizi, d'où les terrasses fluvio-lacustres.

Le soubassement géologique de la zone comprend des roches précambriennes et des formations récentes. Les formations précambriennes sont successivement, du plus ancien au plus jeune (fig. 12).

L'Archéen : constitué d'un complexe gneissique de paragneiss, de gneiss granitiques, mais aussi des amphibolites (localement), des micaschistes quartziques parfois, et même des quartzites (dans les régions de Nyanza - Lac et de la Mugere) (Ntungicimpaye, 1984; Nzojibwami, 1987).

- Le Protérozoïque Moyen (le Burundien):
  - constitue la plus grande partie du précambrien au Burundi et fait partie de la chaine kibarienne.
  - constitué, dans la région envisagée, de micaschistes, gneiss ou amphibolos-chistes (roches à métamorphisme très poussé).

On note, dans ces formations, la présence de roches vertes et de roches ultrabasiques métamorphisées (carte géologique du Burundi, 1/250.000, 1990).

Les formations récentes sont constituées de matériaux allochtones (issus du démentèlement de la dorsale Zaïre-Nil à contenu précambrien et accumulés dans la partie effondrée au cours de l'évolution du Rift).

Dans la partie Nord de la plaine de la Rusizi (région de Cibitoke-Rugombo), deux phases de coulées basaltiques (liées au volcanisme d'âge Cénozoïque du Sud-Kivu), ainsi que leurs relations avec les formations géologiques avoisinantes, ont été décrites (Tack et De Paepe, 1983; Tack, 1984). La coulée la plus ancienne est datée du Miocène (7,5 à 10 m.a), l'autre entre 5 et 7 m.a (Pasteels et al., 1989). Le champs volcanique du Sud-Kivu n'occupe au Burundi que cette partie Nord de la plaine de l'Imbo (Imbo-Nord). Une activité tectonique "récente" (depuis le Néogène à nos jours) est connue dans la plaine (Tack et al., 1987). Cette structure tectonique est responsable de la formation de petites déppressions séparées par des zones plus ou moins surélevées. Ces "bassins", bien distincts, réceptionnent des alluvions issues des reliefs du graben, amenées par les nombreuses rivières qui dévalent du versant occidental.

La répartition en altitude des roches volcaniques est interprétée comme résultant des mouvements dûs à cette activité tectonique du graben.

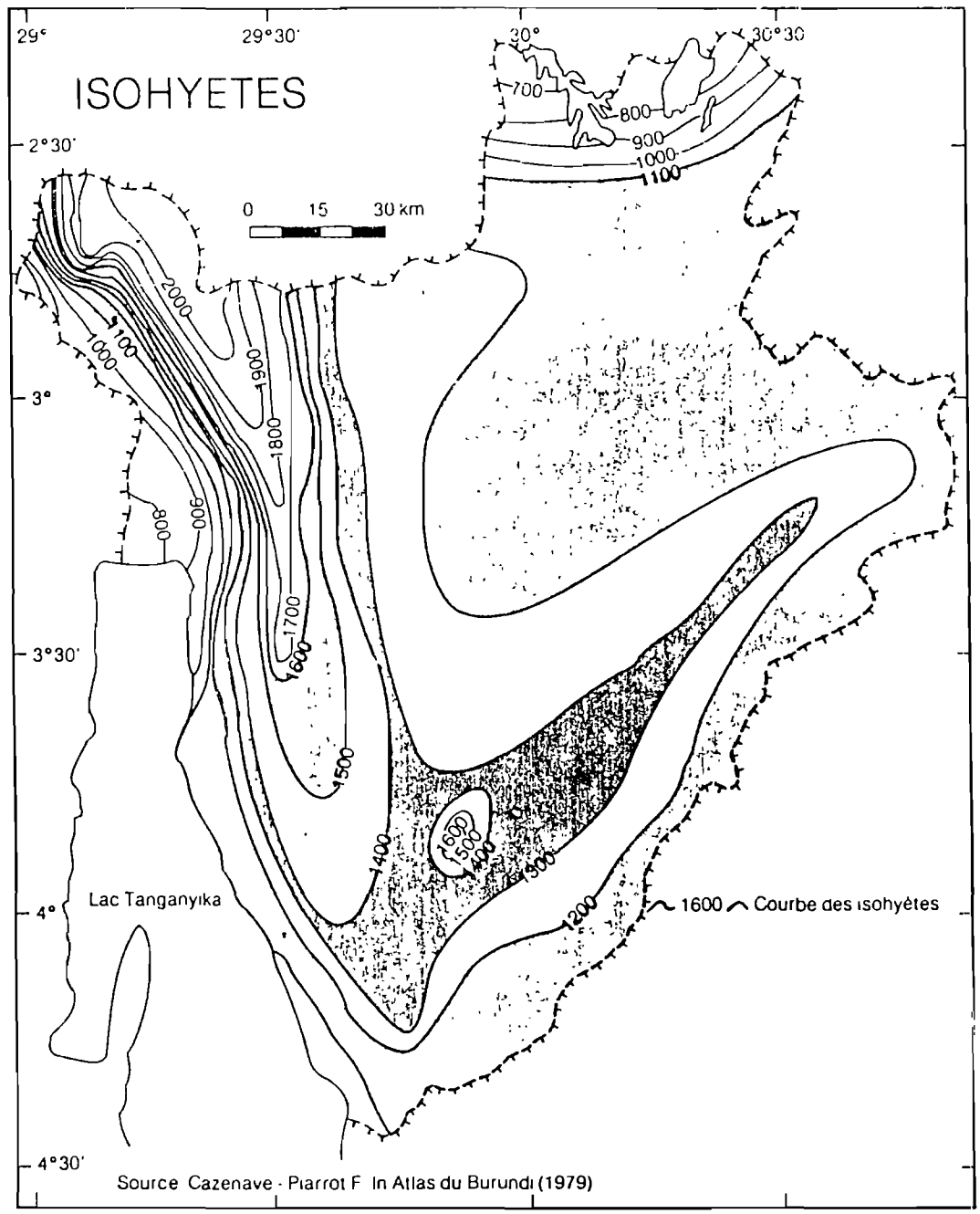


Fig.13: Carte des Isohyètes du Burundi

Les modelés paysagiques, dans la plaine de l'Imbo, résultent de l'interaction de divers facteurs: l'importance et l'âge des failles, la lithologie du substratum, le degré de rajeunissement. C'est ainsi que les modelés paysagiques "séniles" (Davis) que forment les collines basses, sont ceinturés de dépressions, le plus souvent marécageuses. La présence de marécages est due au seuil résistant du cours de la rivière, qui entrave l'écoulement normal des eaux du réseau hydrographique.

I.4.3. Cadre climatique général.

Sur le plan climatique, la situation géographique du Burundi (±2°27′ - 4°29′ Latitude Sud; ±29°- 30°50′ Longitude Est) fait que ce dernier soit parmi les régions à climat intertropical plus ou moins humide. Le climat y est d'avantage sec par l'action des basses altitudes dans la région du Rift, et d'avantage tempéré dans les régions de haute altitude (favorable pour la kaolinisation).

Le Burundi connaît deux saisons: une saison sèche (Mai - Septembre) et une saison pluvieuse (Septembre - Mai). La longue saison pluvieuse présente deux maxima (Novembre - Décembre et Mars - Avril) séparés par un minimum relatif (mois de Janvier) faussément interprété comme étant une petite saison sèche.

La figure 13 donne la répartition moyenne des pluies, et la figure 14 celle des températures sur le territoire burundais (Sottiaux, 1988).

La région où la smectitisation est bien exprimée se limite à la zone du graben. La hauteur moyenne annuelle des pluies y est de 850 mm dans la plaine, de 1200 à 1400 mm dans les contreforts et sur la dorsale (hauteur croissant avec l'altitude). La moyenne annuelle de la température de l'air est voisine de 24°C; les maxima absolus mensuels sont de l'ordre de36 -37°C (enregistrés du mois d'Août à Octobre) tandis que les minima absolus mensuels, 12 à 14°C, sont atteints en saison sèche. La température du sol, variable selon le temps, la couverture végétale et la profondeur, est relativement élevée et oscille entre 27,7°C et 63,5°C. Ces chiffres sont simplement indicatifs et non riguoureux (Frankart et Herbillon, 1971).

Les fluctuations climatiques caractérisant le Cénozoïque (Prasad, 1985; Ladmirand et Roche, 1988) sont reconnaissables au Burundi (Sah, 1967; Ilunga, 1984; Bonnefille, 1987$_{a;b}$; Roche et al., 1988). Ces fluctuations consistent en plusieurs altérnances de périodes, tantôt plus sèches, tantôt plus humides, ayant favorisé la néoformation et la conservation des smectites dans les formations du Cénozoïque.

I.4.4. Conclusion.

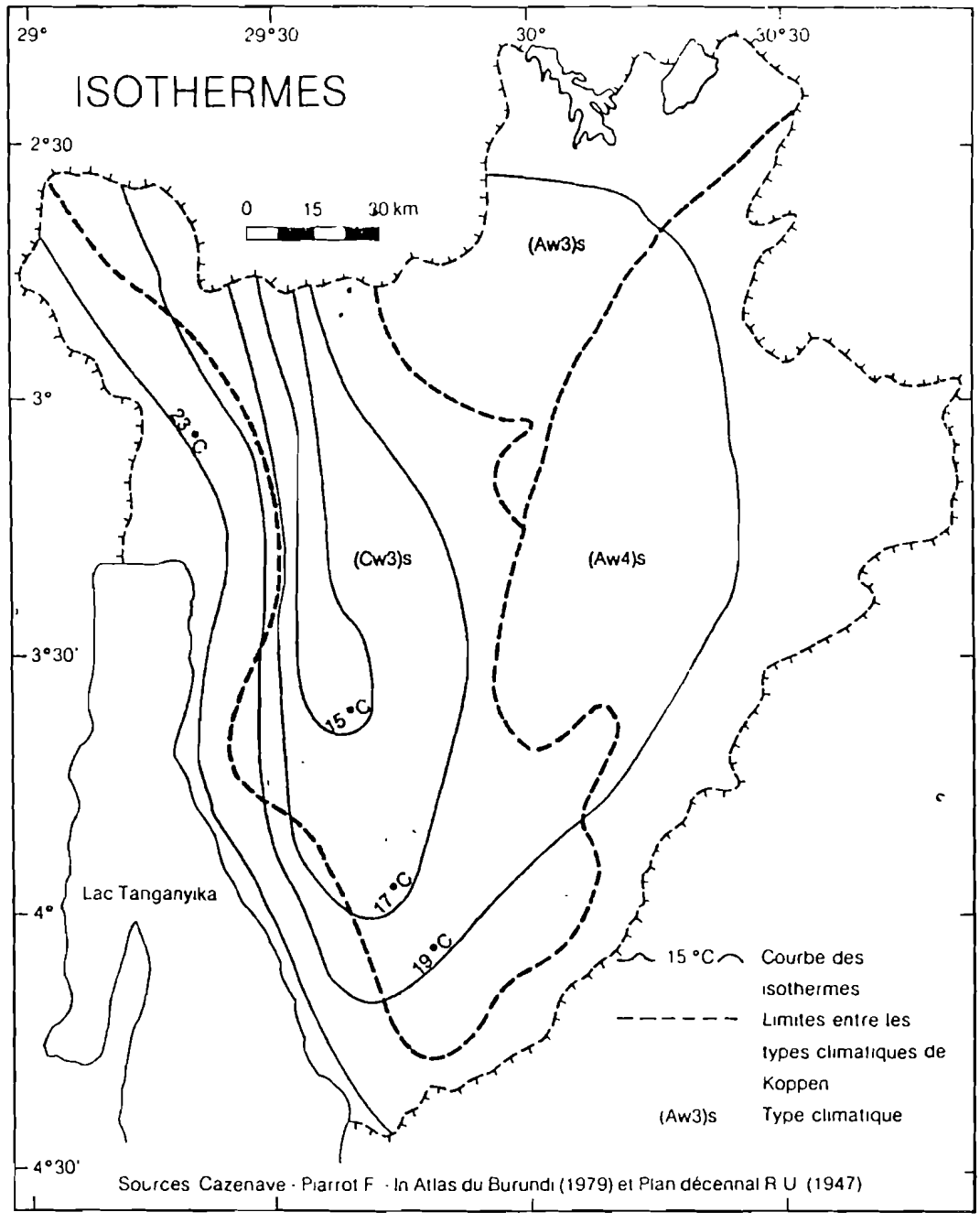


Fig.14: Carte des Isothermes du Burundi

Les occurrences de smectites ne sont nullement dues au hazard. C'est, en effet, une région déprimée, sous un climat relativement sec, avec des dépressions relativement confinées. Enfin, les matériaux du substratum, riches en minéraux phylliteux et en ferromagnésiens, sont favorables pour la formation des smectites.

I.5. OCCURRENCE DES SMECTITES AU BURUNDI.

Ce n'est que dans les sols du graben du Lac Tanganyika que s'observent des argiles où les minéraux smectitiques sont en quantité appréciable. Ces vertisols et sols vertiques (I.1.7) sont localisés dans certains endroits de la plaine. La smectitisation y est toute fois limitée. Elle conduit à la présence de masses d'argiles gonflantes qui méritent une attention particulière sur le plan scientifique, mais ne présentent qu'un intérêt utilitaire limité dans la majorité des sites.

Du fait que les observations ont montré des quantités limitées de smectites, nous utiliserons le terme "**occurrence**", celui de "**gisement**" étant utilisé pour des sites à quantité exceptionnellement importante, voire même susceptible d'être exploitée avec un intérêt économiquement acceptable.

I.5.1. Inventaire des "sites à smectites".(Fig. 12; Fig. 15).

Au Burundi, les occurrences de smectites en quantités relativement appréciables, ont été regroupées en cinq régions tout au long du graben du Lac Tanganyika. Ils'agit de:

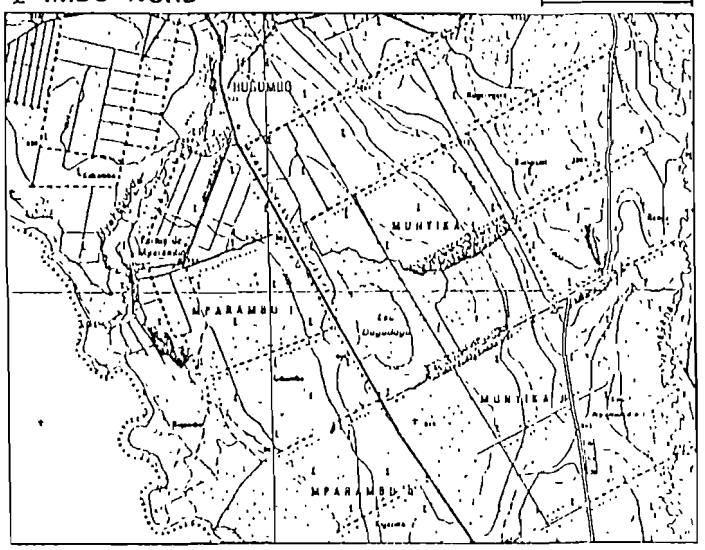
1° - la région de l'Imbo-Nord (I);
2° - la région de l'Imbo-Centre (II);
3° - la région de Bujumbura (III);
4° - la région de Rumonge (IV);
5° - la région de Nyanza-Lac (V).

Dans ces régions, la présence de smectites est liée à l'existence de vertisols et/ou de sols vertiques (I.1.7) (ISABU; cartes pédologiques).

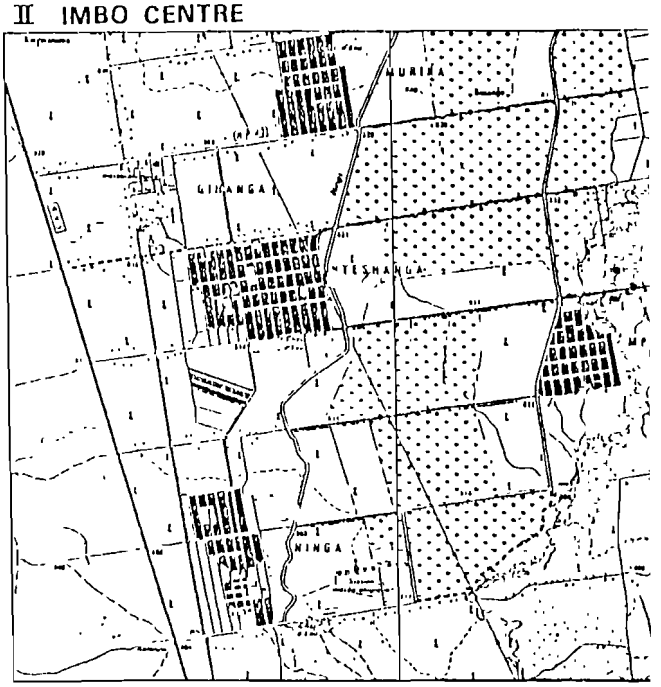
I.5.2. Limites du travail.

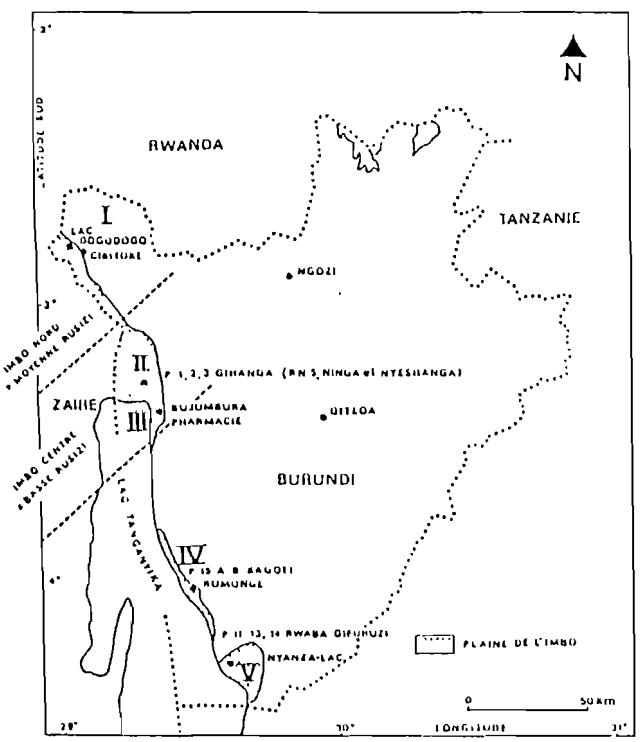
Le présent travail a pour objectif de caractériser du point de vue morphologique (= terrain, profils), granulométrique, chimique et minéralogique les matériaux des sites ci-haut évoqués (I.5.1), en vue d'essayer de comprendre leur génèse, leurs propriétés, ainsi que leurs aspects du point de vue géotechnique, agricole et industriel. Il n'est pas question ici d'en évaluer les réserves ou de procéder

I IMBO NORD

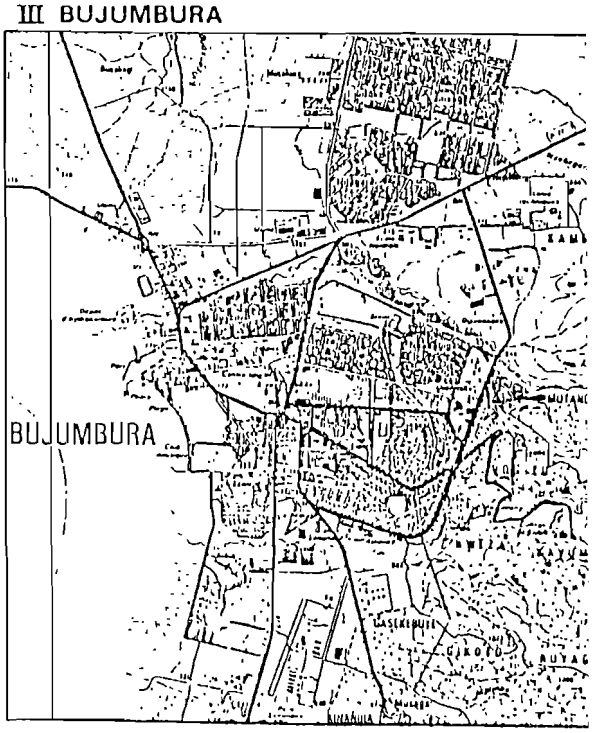


II IMBO CENTRE

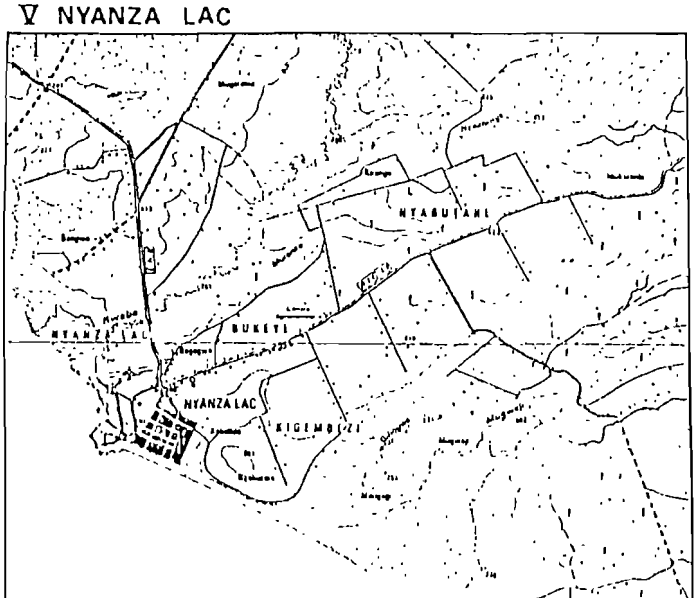




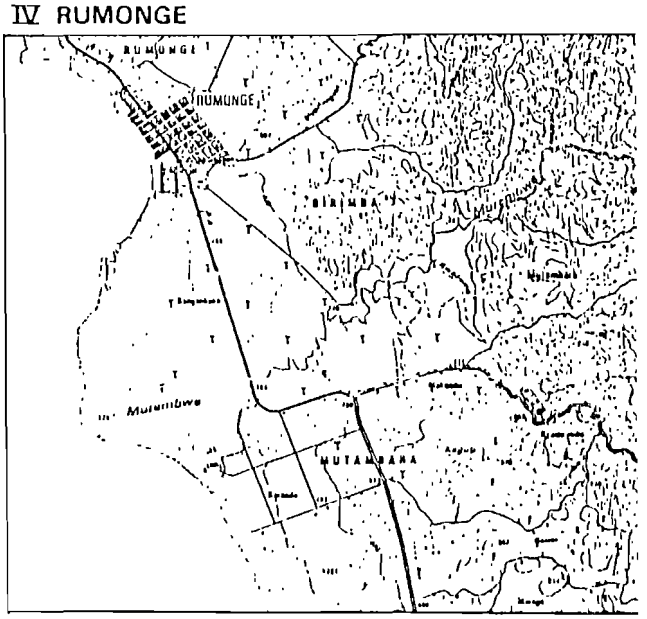
III BUJUMBURA



V NYANZA LAC



IV RUMONGE



à de quelconques études de faisabilité en faisant intervenir, parmi d'autres, des facteurs socio-économiques. Le présent document se voudrait être un point de départ en proposant des cibles pour des recherches et applications ultérieures.

I.6. CONDITIONS D' EXECUTION DU TRAVAIL.

Les travaux ont commencé en Juillet 1990 par une analyse bibliographique de divers documents en rapport avec le sujet.

La rédaction provisoire du premier chapitre qui traite des généralités et des définitions, fut entreprise dès la mi-Septembre. Avec le mois d'Octobre, des journées de travaux de terrain furent organisées. Ceux-ci ont permis d'observer, de décrire et de récolter quelques échantillons d'argiles smectitiques.

Après avoir récolté les échantillons des différents sites choisis, les travaux de laboratoire portant sur les analyses aux Rayons-X, ont été effectués à Liège (Belgique) sur une série d'échantillons sélectionnés, jugés représentatifs. Dans la même période, une autre série d'échantillons a fait l'objet des analyses chez Müller - Diel (Faculté des Sciences Appliquées, Université du Burundi) en vue de caractériser géotechniquement les argiles smectitiques du Burundi.

Durant le mois de Décembre, une cartographie "en salle" (celle de l'Imbo-Nord et Imbo-Centre) a été effectuée en se basant sur des documents établis au préalable et en y intégrant nos propres observations. L'étape suivante a été celle de compuler les données relatives au second chapitre. Dans le même temps, les chapitres premier (suite et fin) et second (début) ont été rédigés.

Dès la mi-Mai 1991, à l'occasion de la visite du Prof. Thorez (Université de Liège, Belgique) au Burundi (pendant deux semaines), une discussion sur le travail a eu lieu et des conseils pour la suite de la rédaction ont été donnés. C'est à partir du 06/ 05/ 1991 qu'a débuté la discusion des résultats analytiques (des échantillons) de Liège (Prof. Thorez) et ceux obtenus à la Faculté des Sciences Appliquées (Prof. Müller).

CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX ETUDIES.

Pour chaque site (I.5.1), sont présentés: la situation géographique les contextes géologique et pédologique, les observations de terrain et les descriptions de profils, les analyses granulométriques, les analyses minéralogiques aux Rayons-X, ainsi que les données des bulletins analytiques chimiques des pédologues comme par exemple les teneurs en cations (K^+, Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}) ou la C.E.C. Pour la région de l'Imbo-Nord, des analyses chimiques de smectites sont disponibles. (Annexes I. 2).

Les données de terrain s'appuient sur un inventaire détaillé de plages représentatives de vertisols et sols vertiques. (Annexe I). La cartographie de détail de ces sols gonflants est difficile à réaliser. Les levés de coupe et les observations de terrain, complétés par des mesures de pressions de gonflement en des points très proches les uns des autres, montrent que la cartographie est peu réaliste, du fait de la très grande variabilité latérale des faciès à très courte distance (Müller, 1991).

Le prélèvement des échantillons a été guidé par le souci de suivre qualitativement et quantitativement les évolutions des smectites (et les minéraux argileux associés) au sein des coupes verticales (en puits courts de 2 à 3 m, à la tarrière) et latérales. Une fraction de chaque échantillon est conservée comme témoin au Département des Sciences de la Terre à l'Université du Burundi (collection Bucumi).

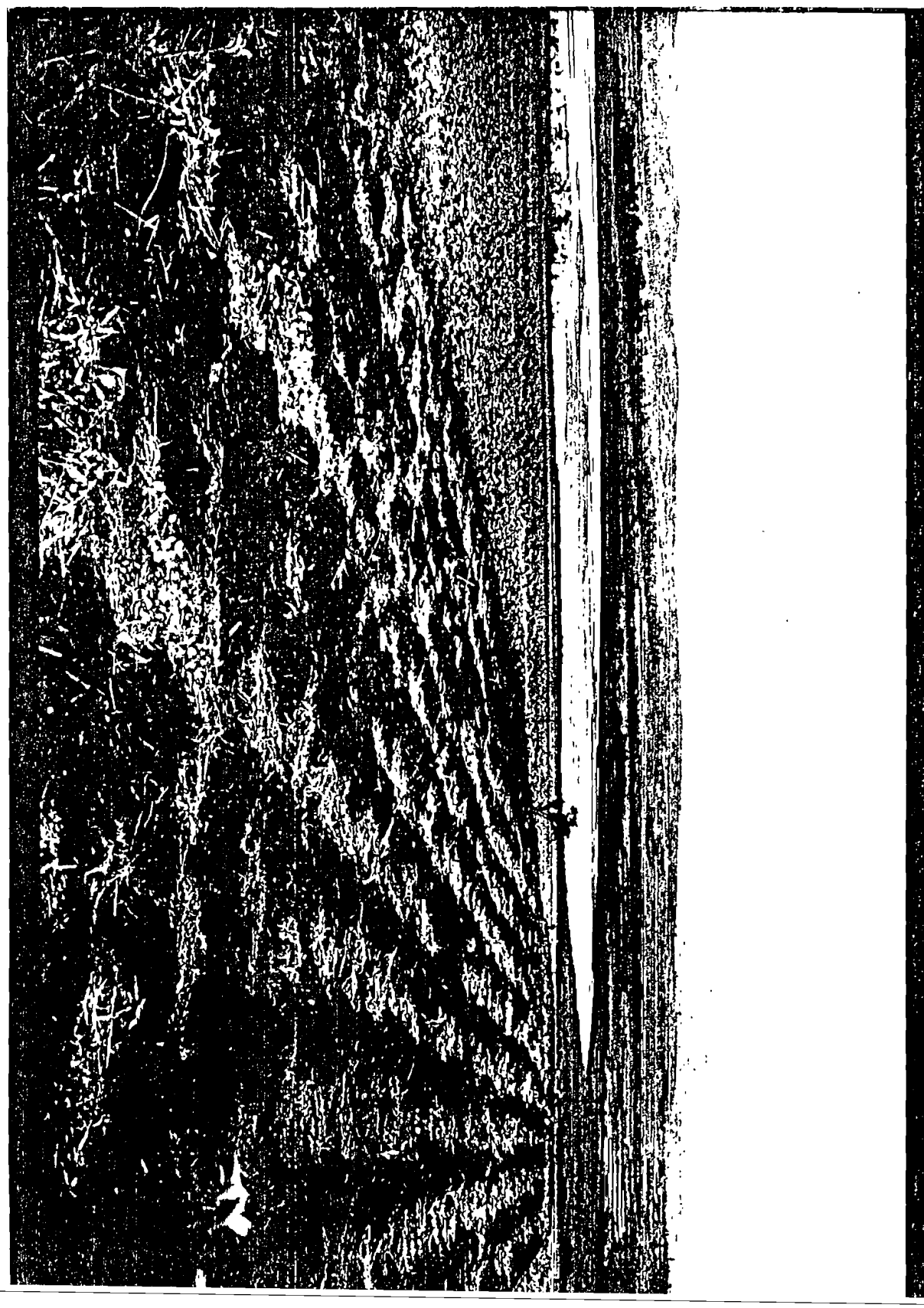
La plupart des données analytiques ont été reccueillies à partir des travaux divers sur les sols de la plaine. Elles seront discutées au niveau des résultats.

Les méthodologies des analyses diffractométriques (aux Rayons-X) et chimiques, sont données aux annexes III et IV.

L'étude des échantillons a été réalisée grâce à la contribution scientifique des Professeurs Müller (Université du Burundi, Faculté des Sciences Appliquées), Tack (Musée Royale de l'Afrique Centrale, Tervuren), Chartry (Département de Géologie, Burundi) et Thorez (Université de Liège, Belgique). Elle a été complétée en Belgique par des analyses diffractométriques (Goemaere, 1991).

La méthodologie choisie pour quantifier les smectites par rapport aux autres minéraux (argileux ou non) associés, utilise les intensités non corrigées des réflexions basales (annexe III.1). Tous les tableaux des données diffractométriques (intensités des réflexions à divers tests, leurs rapports, les résultats qualitatifs et quantitatifs) sont présentés en annexes III.4 (tableaux 1 à 6), III.6 (tableaux 1 à 5), III.9, III.11. Tous ces résultats sont classés par région d'étude. Les valeurs chiffrées sont données à une décimale. Cette dernière n'a d'autre signification pratique que de pouvoir exprimer

Photo : IMBO. NORD (environs du lac Dogo-Dogo).



quantitativement les composants mineurs.

Il existe d'autres types d'analyses pour l'étude des smectites, qui n'ont, toutefois, pas été utilisés dans le cadre de ce travail. Il s'agit essentiellement de l'analyse thermodifférentielle (A.T.D), de l'analyse thermopondérale (A.T.P), de l'analyse spectroscopique en infra-rouge, de l'analyse à la microsonde et des observations au microscope électronique par balayage (M.E.B) ou par transmission (M.E.T).

II.1. La région de l'Imbo-Nord.

II.1.1. Situation géographique. (Fig. 16; Fig. 17).

Les vertisols et les sols vertiques de la région forment des plages pédologiques de forme et dimension variables. Ils sont inscrits dans un quadrilatère limité, à l'Ouest par la rivière Rusizi, au Nord par la frontière entre le Burundi et le Rwanda (rivière Ruhwa), à l'Est par les contreforts de la crête Zaïre-Nil, et au Sud par la rivière Nyagatunguru.

L'Imbo-Nord couvre approximativement une superficie de 30.000 ha. L'aire la plus représentative des plages vertisoliques de la région, se situe autour du petit lac Dogo-Dogo (Transversales T_3 - T_5).

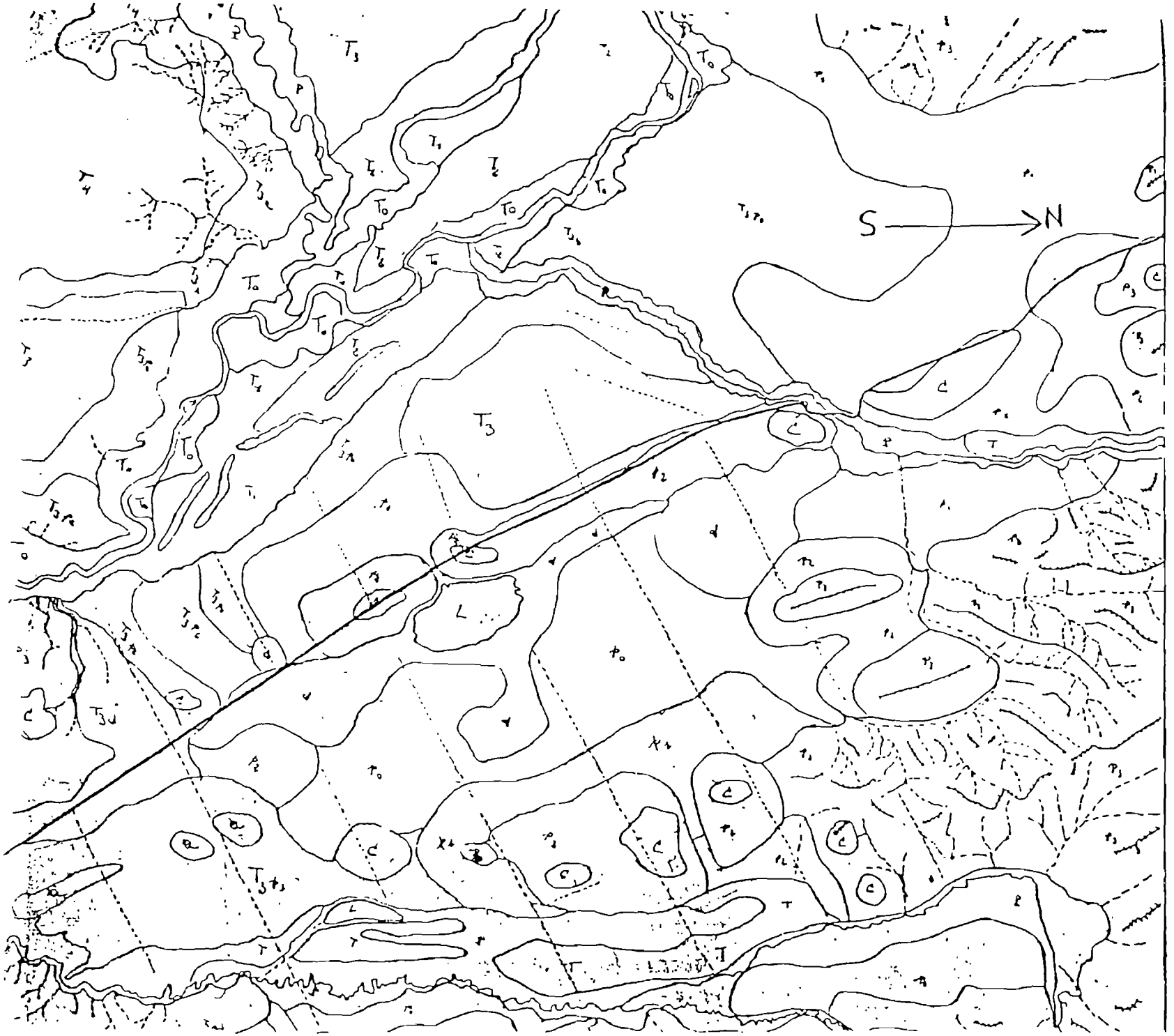
L'analyse de la couverture aérienne (Dulaunois, 1979, Compagnion, 1979) a permis de mettre en évidence plusieurs entités morphologiques (fig. 16).

II.1.2. Contextes géologique et pédologique. (Fig. 17; Fig. 18; Fig. 19; Fig. 20).

La zone smectitisée de l'Imbo-Nord s'inscrit dans des terrains de couverture, et, localement, est traversée par des coulées basaltiques perpendiculairement à la T_4 (transversale n° 4) (fig. 17). Ces coulées sont une manifestation du volcanisme Cénozoïque de la province du Sud-Kivu (Pasteels et al., 1981). La répartition en altitude de ces roches volcaniques, est interprétée comme résultant de remontées dues à l'activité tectonique du graben (Tack, comm. pers.).

L'extension en surface de ces coulées basaltiques, nottamment dans le secteur lac Dogo-Dogo - Cibitoke, est difficile à préciser. L'altération et l'érosion ont fait disparaître certaines coulées, mais aussi affecté les sols et les matériaux développés sur le substrat basaltique (Goemaere, 1991).

Les formations de couverture sont formées par un complexe alluvionnaire qui regroupe les alluvions fluviatiles et lacustres anciennes et des alluvions fluviatiles récentes et actuelles (terrasse de la



- fig. 16 .

Carte géomorphologique

(Photos aériennes

1/50.000)

LEGENDE

To...4 : niveaux de terrasse de la Ruzizi

P : plaine alluviale des affluents

C : sommet de colline

d : dépression

a : ados

L : lac

po...3 : pente faible à très forte

---- : ligne d'écoulement

⟿ : ligne de crête

------ : Transaxes

____ : Route Bujumbura Bukavu

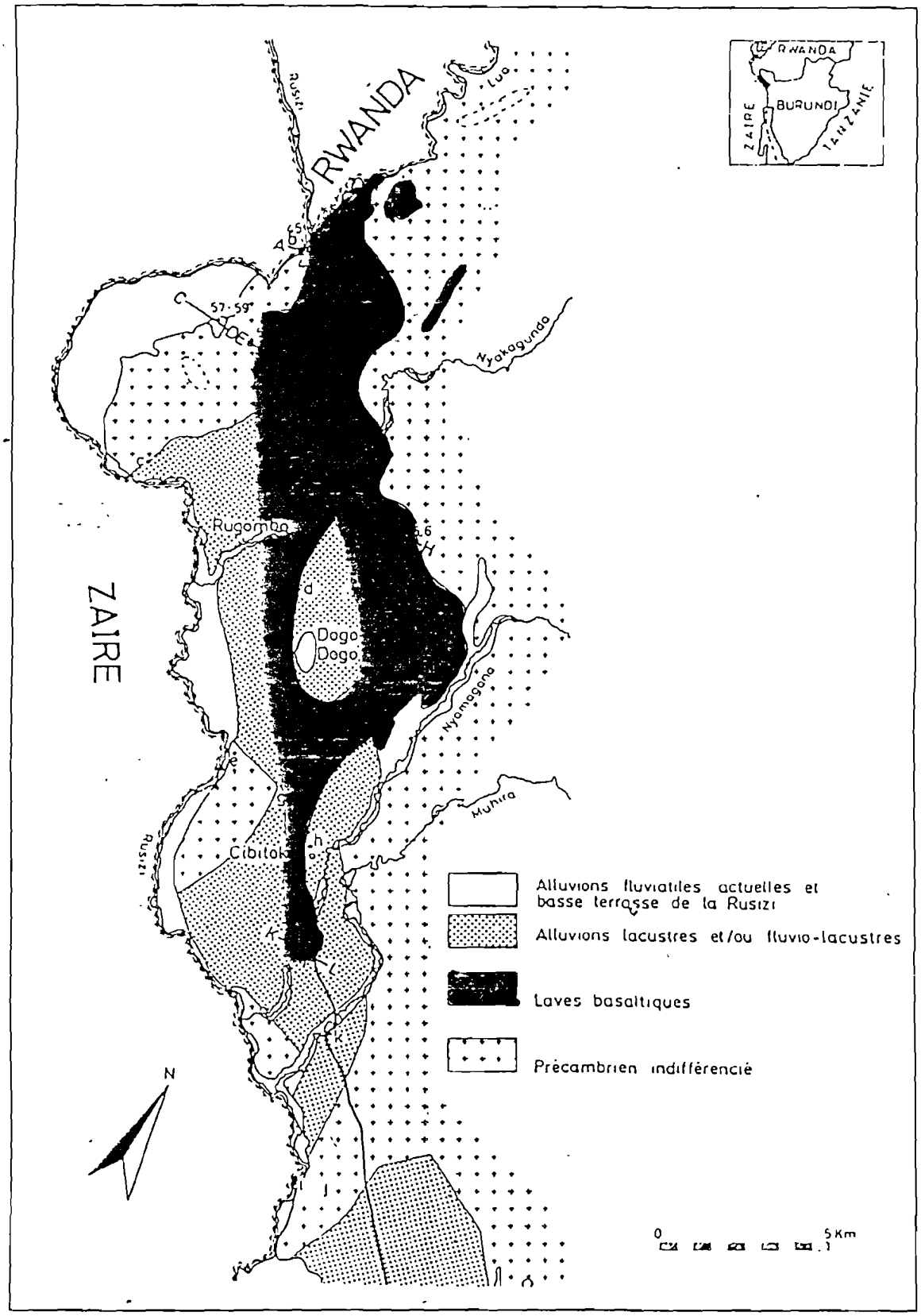
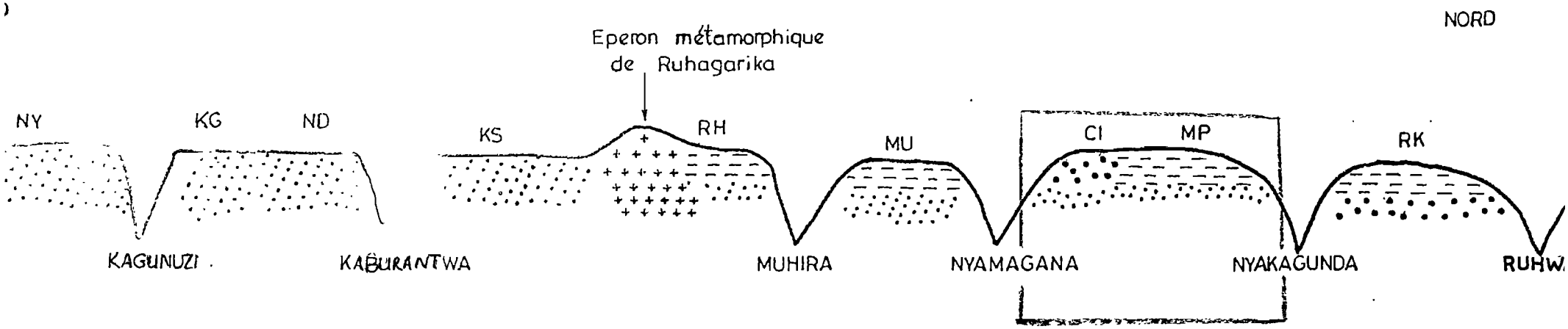


Fig 17: Carte géologique de la région de CIBITOKE.

Fig 18: Répartition synthètique, schématique, géographique des divers types de matériaux selon l'axe Nord-Sud dans l'Imbo Nord



: Matériaux à filiation basaltique

: Eperon métamorphique (Ruzizien)

: Gravières

: Alluvions anciennes.

Zone prospectée.

NY : Paysannat Nyamitanga
KG : Paysannat Kagunuzi
ND : Paysannat Ndava
KS : Paysannat Kasenyi
RH : Paysannat Ruhagarika
MU : Paysannat Muhira
CI : Paysannat Cibitoke
MP . Paysannat Mparambo
RK : Paysannat Rukana.

Rusizi).

Par le jeu des failles postérieures à la mise en place des coulées basaltiques, le substratum antécambrien (éperons métamorphiques) (Tack et De Paepe, 1983; Tack et al., 1987) affleure localement (fig. 18). La transition entre les dépôts lacustres et les dépôts fluviatils récents, est marquée par des falaises (failles) à pentes assez fortes.

Des encroûtements carbonatés s'observent, soit au niveau des falaises, soit en profondeur, à quelques centimètres (30 - 50Cm) en-dessous de l'argile noire, soit même en affleurements massifs à la surface, dans les argiles noires. Ces encroûtements, longtemps considérés comme des travertins, sont en fait des "caliches" ou "calcrètes". Leur accumulation s'explique par une migration des solutions concentrées, dans la tranche des sols, qui précipitent dans des conditions arides (pendant la saison sèche), favorables à la néoformation des smectites.

Des travaux pédologiques et géochimiques récents confirment leur nature et les expliquent comme résultant d'une accumulation géochimique par migration verticale (ascendante) et oblique des solutions au sein des sols, à une faible profondeur; ce processus étant un résultat de la mise en solution de Ca^{++} pendant la saison humide:

$$CaCO_3 + H^+ \text{-------} > Ca^{++} + HCO_3^-$$

Après drainage chimique de Ca^{++} et HCO_3^- le long du bassin versant, le $CaCO_3$ précipite par évaporation (pendant la période aride). Les pores se comblent ainsi en calcite, avec possibilité à la longue, de formation d'une croûte calcaire (due à la saturation en Ca^{++}, de bas en haut et de l'amont vers l'aval). Les conditions fondamentales du mécanisme de cette induration calcaire, à savoir le "stock" disponible de Ca^{++}, dans un bassin endoréique (zone de réception des cations) et le climat, sont les mêmes que celles qui sont favorables pour la génèse des smectites.

Des plages à galets fluviatils sont identifiés, principalement le long des rivières Nyamagana, Nyakagunda, Muhira,... . Les galets de quartz et quartzite sont de dimension qui peut aller de 1 à 5Cm. Ils forment des gravières, cartographiées comme des "lithosols" par l'ISABU (Institut des Sciences Agronomiques du Burundi).

La figure 20 montre qu'il n'y a pas d'identification parfaite entre l'entitée géomorphologique et la loi de distribution normale des vertisols sur un substratum basaltique (en zones déprimées). L'activité tectonique de faille se reconnaît dans cette région par le style structural en "pseudo-cuesta", structure tectonique qui montre des blocs assymétriques (basculés vers la Rusizi). Cette phase tectonique, "récente" dans l'histoire du Rift et connue depuis le Néogène (26 m.a) jusqu'à nos jours [recensée par la présence d'une série de sources d'eaux chaudes (Tack et De Paepe, 1983) et prouvée par les données sismiques (Tack et al., 1987)], expliquerait l'origine du lac Dogo-Dogo et celles d'autres petites dépressions de la plaine, où se sont développés les vertisols. La même phase tec-

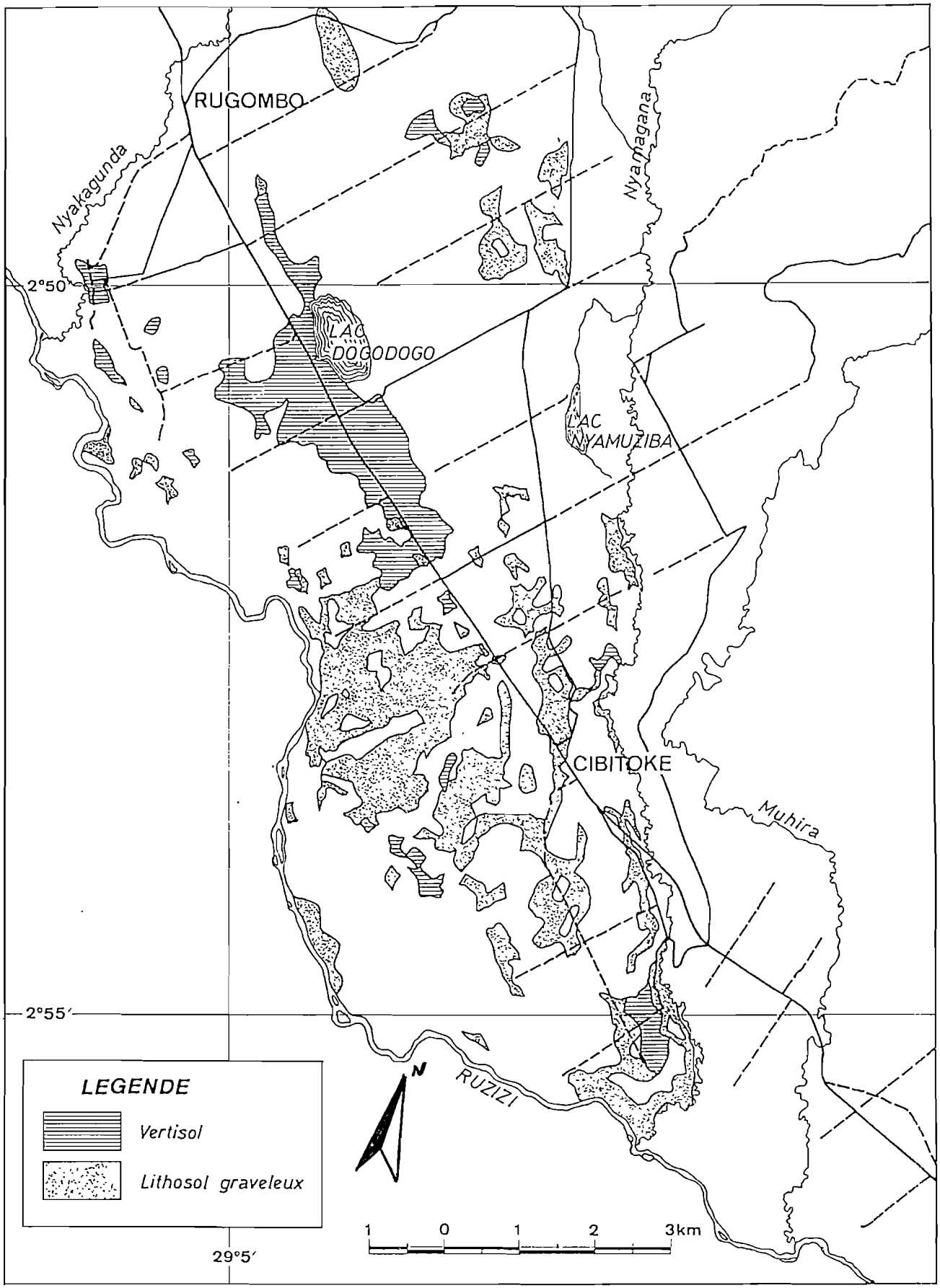

RUGOMBO
Nyakagunda
Nyamagana
2°50'
LAC
DOGODOGO
LAC
NYAMUZIBA
CIBITOKE
Muhira
2°55'
RUZIZI
N
LEGENDE
Vertisol
Lithosol graveleux
1 0 1 2 3km
29°5'

FIGURE 19 : [illegible]

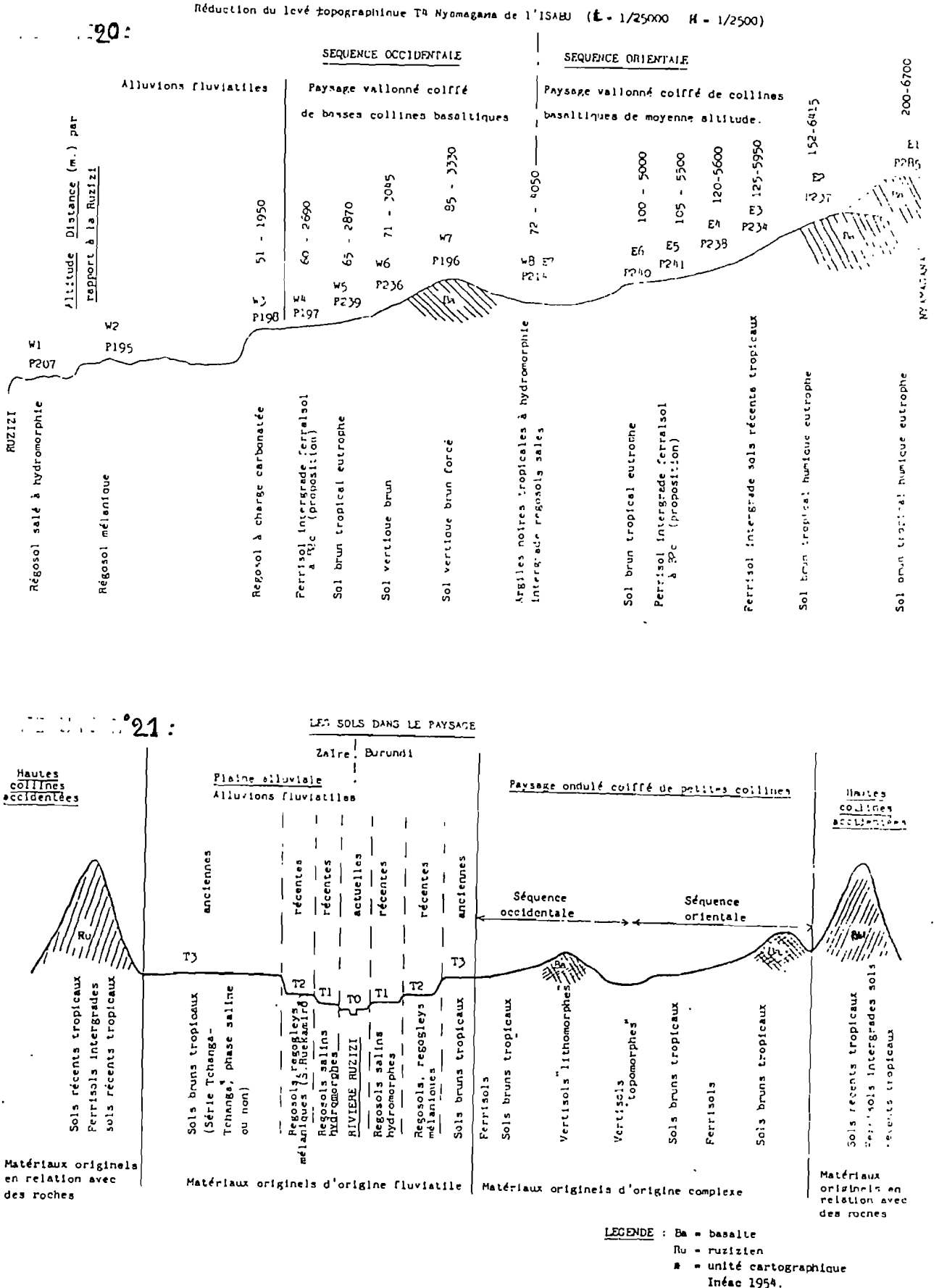


Figure N°20 : Coupe Ouest-Est, à la hauteur du Lac Dogodogo, à travers le graben du Tanganyika: la disposition des sols dans le paysage (Delaunois, 1979, Compagnon, 1979).

Figure N°21 : Coupe Ouest-Est, depuis la Rusizi jusqu'à Nyamagana: la disposition des sols dans le paysage (Delaunois, 1979, Compagnon, 1979).

tonique expliquerait la disposition surélevée actuelle (par inversion de relief) des vertisols associés aux coulées basaltiques. Ces basaltes sont surmontés localement par une terrasse fluviatile de galets quartzeux, quartzitiques et rarement amphibolitiques. A d'autres endroits, le basalte est coiffé par des argiles noires smectitiques. Ces dernières occupent une place considérable dans la région de Cibitoke. Les agronomes y ont contrasté différents types génétiques, en qualifiant de "lithomorphes" les vertisols qui coiffent la coulée basaltique, et de "topomorphes", ceux qui sont formés dans les dépressions morphologiques, sans contact visible avec un substrat volcanique.

II.1.3. Observations de terrain et description de profils. (Fig. 20; Annexe I.3; Fig. 2[illegible]).

Les données de terrain totalisent cent trente-et-un points dont vingt-et-un ont fait l'objet de mes propres observations (fig. 2[illegible]). S'y ajoutent cent et cinq profils pédologiques et dix autres, qui ont été décrits respectivement par le Service Géologique du Burundi (annexe I.1.3) et par le Service de l'ISABU (Fig. 20; annexe I.1.2).

L'échantillonnage couvre, pour l'essentiel:

a) des vertisols s.s (ceux dits lithomorphes et topomorphes) et des sols à caractères vertiques;

b) quelques sols particuliers (annexe I.1.1):

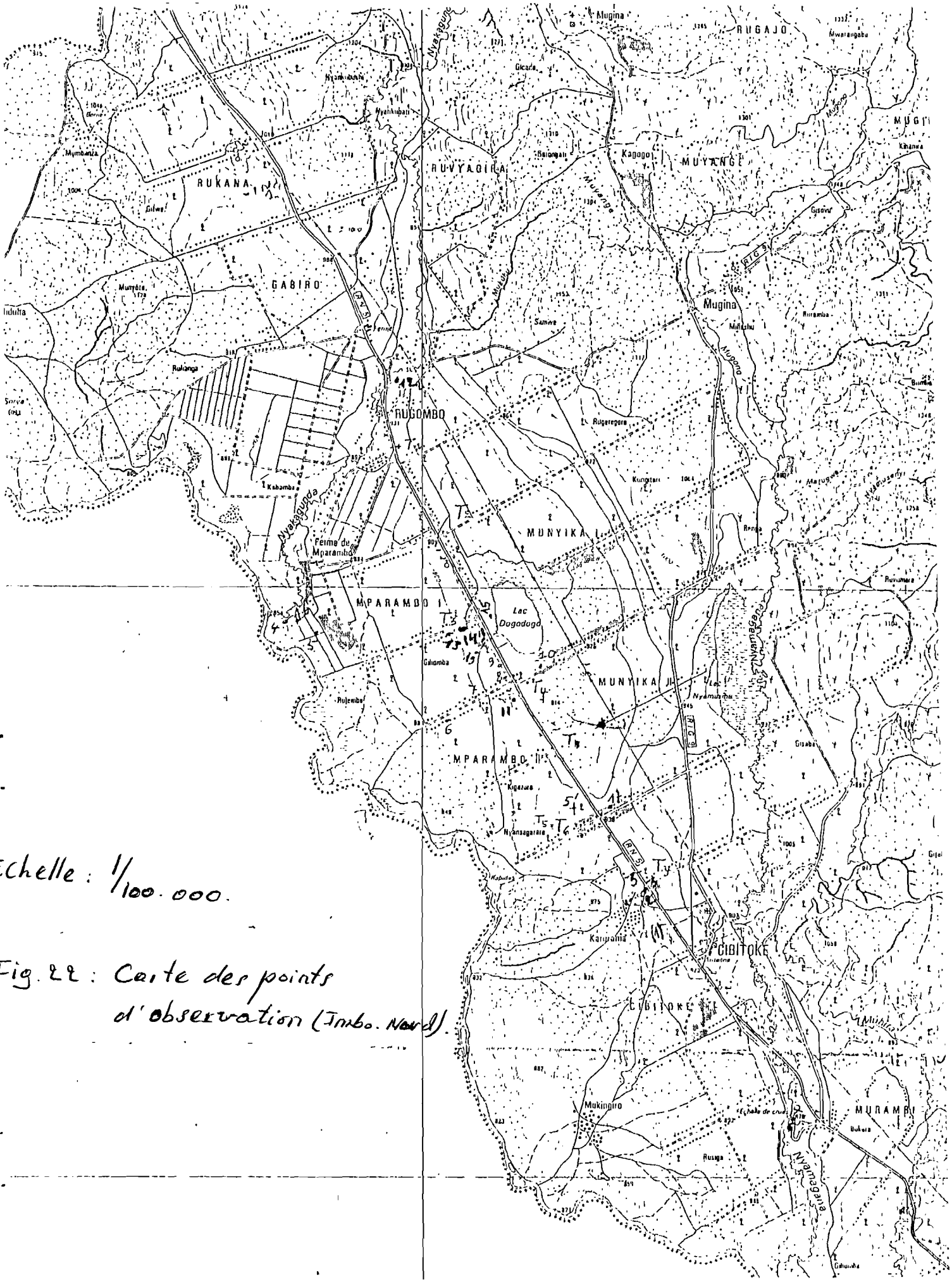
- argiles d'altération directe du basalte (points 1, 6 et 7);
- ferralsols (altération ferralitique du basalte) (points 12_1 - 12_2);
- "kaolin" (point 3).

Ce prélèvement a été conduit dans l'optique de mieux cerner la nature réelle des vertisols étudiés.

Dans le paysage, des zones de graviers, non habitées, s'observent. Ils sont constitués de galets, de nature quartzique et amphibolitique, de dimension et forme variables (arrondis à anguleux) et des cherts. Du bois-fossile, d'âge Mio-Pliocène à Pléistocène, mis à jour lors de la mise en exploitation de carrières dans les graviers, a également été observé (Fairon-Demaret, Dreesen et Reeckmans, 1981).

Ces "gravières" sont parfois d'extension assez grande, et sont d'une épaisseur très variable (de zéro à quelques mètres). Elles présentent une forme en biseau et reposent sur un soubassement basaltique. On note dans ces gravières, une absence systématique de galets de la roche basaltique sous-jacente.

Dans les plages de vertisols, les mêmes galets s'observent à la surface comme en profondeur des profils, où ils forment parfois des "lentilles" fortement graveleuses interstratifiées (d'origine



Echelle : 1/100.000.

Fig. 22 : Carte des points d'observation (Imbo. Nord).

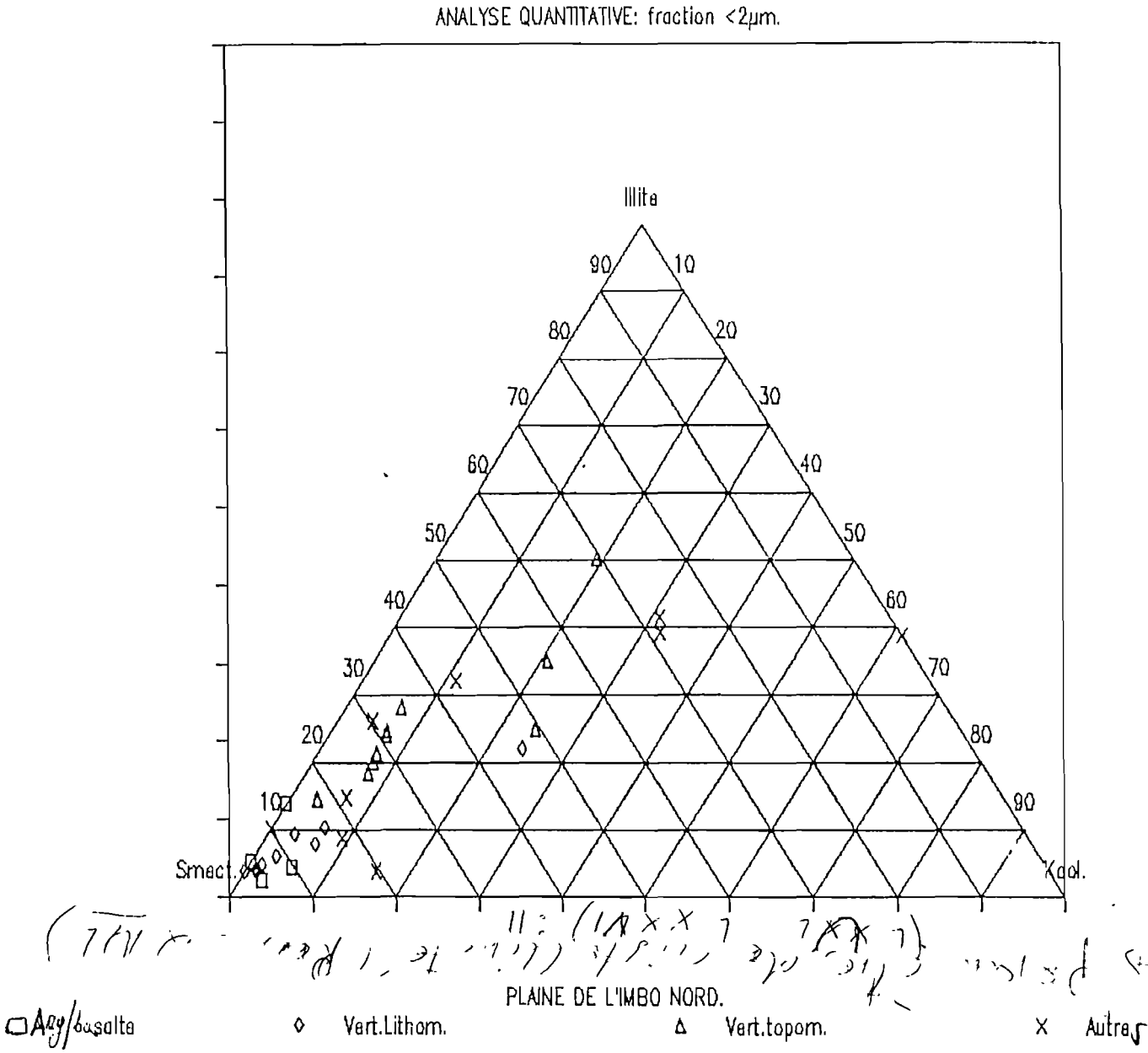


Fig. 1 : Diagramme triangulaire de représentation des résultats semi-quantitatifs pour la région Imbo-nord : contraste entre vertisols "lithomorphes", topomorphes et les produits argileux d'altération des basaltes fraîches

sédimentaire) par dessus le soubassement basaltique. Ce dernier montre un début d'altération en "en boules", avec une argile d'altération jaune-verdâtre, lardée de multiples fentes de retrait, de largeur millimétrique (Cfr diapositive n° 2 en annexe I.1.1).

Les observations faites sur les produits d'altération directe de la coulée basaltique (argiles vertes et produits ferralitiques) montrent que:

a) les argiles vertes (fig. 2 aux points 1, 6 et 7):

- occupent la partie superficielle du basalte en voie d'altération et sont isolées des vertisols de la zone;
- sont recouvertes par des lits de galets de dimension et forme variables, puis par des argiles noires vertisoliques (cfr diapositive n°2 en annexe I.1.1);
- sont lardées de multiples fentes de retrait, de largeur millimétrique;
- sont probablement monominérales ?

b) les produits d'altération ferralitique (fig. 2 aux points 12_1 - 12_2) sont des matériaux (de couleur rouge) qui résultent de l'effet de l'oxydation du basalte (conditions oxydantes presque à l'altitude des vertisols associés au basalte).

Les concrétions massives carbonatées, d'une épaisseur qui dépasse 1,5m (cfr. annexe I.1.3), sont observées à plusieurs endroits dans la région. Dans les argiles noires, elles affleurent souvent à la surface.

Dans la terrasse de la Rusizi, on observe des micro-reliefs (= micro-levées formées de galets de basalte et d'autres roches apportées du Nord du Burundi et/ou de la province volcanique du Sud-Kivu, avec des formes et des dimensions variables) qui alternent avec des mini-dépressions où l'on note le début de formation d'un sol aux propriétés vertiques (le "régosol mélanique") (échantillons 4 - 5).

Par ailleurs, dans le cadre du projet d'une cimenterie au Burundi, cent quatre-vingt-six profils ont été étudiés par le Service Géologique du Burundi (annexe I.1.3). Ceux-ci ont été prélevés dans les "caliches" (ou "calcrêtes") qui affleurent à une faible profondeur (un peu moins d'un-demi mètre) en-dessous de l'argile noire. Cent et cinq de ces derniers sont repris en annexe I.I.3. Cela nous a permis d'estimer la profondeur maximale des argiles.

II.1.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). (Annexe II: tableaux 1 à 7).

Les auteurs des analyses granulométriques des échantillons des vertisols, sont, d'une part, deux mémorants (Dulaunois, 1979 et Compagnion, 1979) de l'Université Catholique de Louvain, qui ont procédé à l'analyse des échantillons des profils W.7 et W.8. D'autre part, les données granulométriques relatives aux profils INO.1; INO.4; INO.8; INO.19; INO.23, ont été fournies par J. Gourdin et P. Hollbosch (Laboratoire de Chimie Agricole de l'ISABU). Les résultats sont présentés sous forme de bulletins analytiques. (Annexe II: tableaux 1 à 7). Ceux-ci montrent que les matériaux vertisoliques sont très homogènes et très riches en argiles. La teneur en ""*pseudo – sables*"* assez élevée en surface, diminue en profondeur. Le refus, fait principalement de galets roulés de quartz (et très rarement de débris de basalte altéré), prend de l'importance avec la profondeur.

[2]

II.1.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. (Annexes III.4: tableau 1; III.9: tableau 1; III.10: tableau 1; *Fig*.23 à 26).

Les smectites ont fait l'objet d'un examen attentif en diffractométrie. De nombreuses mesures ont été effectuées sur la fraction < à 2µm, en agrégats orientés (A.O) (après les tests en routine et les saturations au K^+ et au Li^+). Les mesures faites ont porté sur les faits suivants:

a) position de la réflexion d(001) dans des conditions d'humidité relative (RH) comprise entre 45% et 60%;

b) taux de migration de la réflexion basale après glycolage et chauffage;

c) présence de réflexions harmoniques ou non au naturel(N) et surtout après EG. Estimation de la "classe de cristallinité" des smectites (Thorez, 1976);

d) calcul du paramètre V/P des smectites (Biscaye, 1964).
(Annexe III.6: tableau 1);

e) présence éventuelle d'interstratifiés irréguliers (10 - 14Sm);

f) test de saturation au LiCl (Li^+_N - Li^+_{300} - Li^+_{300Gl}) et identification de la nature béidellitique et/ou montmorillonitique des smectites;

---

2 * "pseudo-sables": sous cet intitulé, les auteurs des analyses entendent le pourcentage d'éléments classés en granulométrie dans la fraction sableuse obtenue par tamisage, qui ne résistent pas au traitement de l'attaque par HCl concentré, après traitement de HCl 2% et à l'eau oxygénée. Ces éléments sont constitués de débris de roches altérées, de matériaux amorphes,...

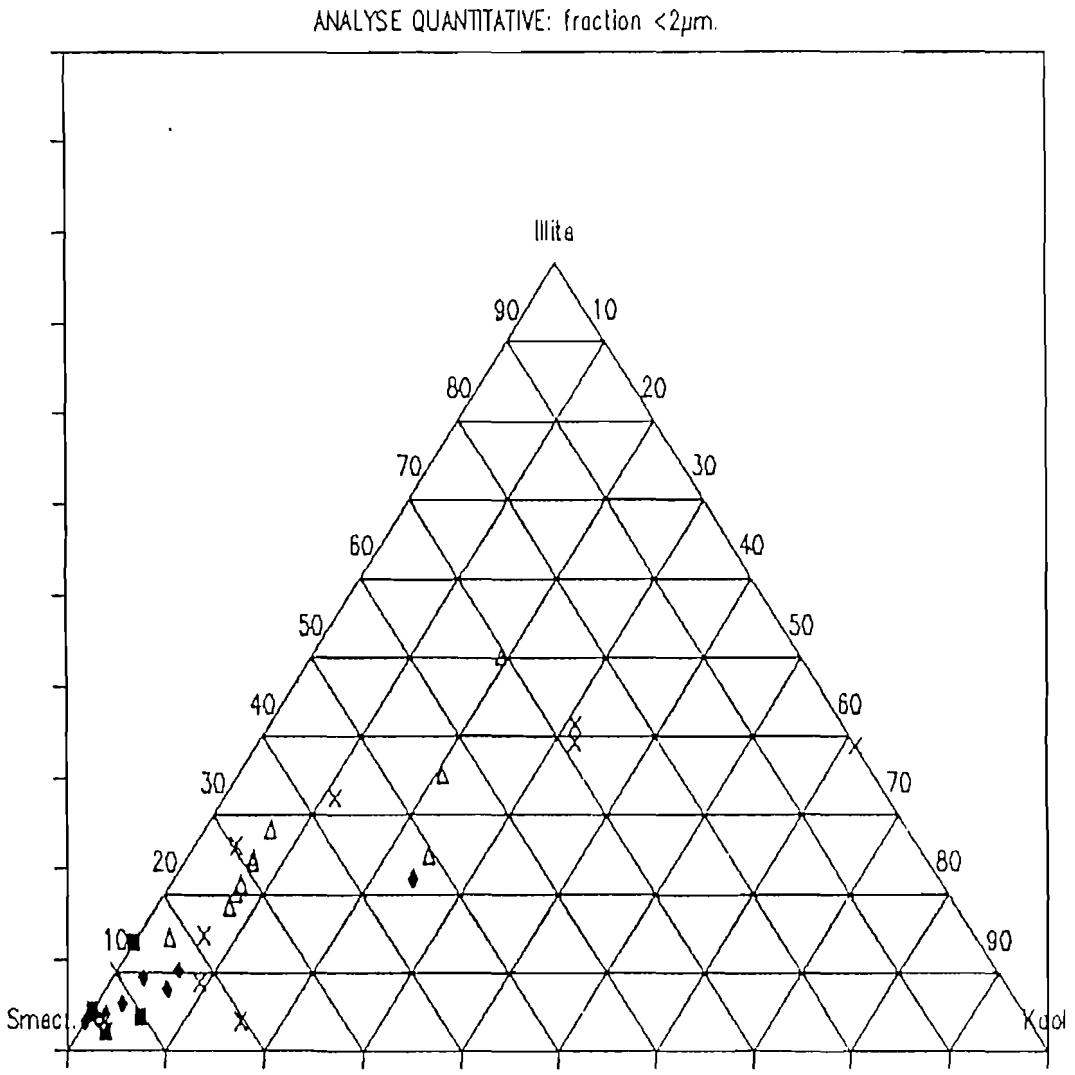


Figure N°23: Diagramme triangulaire de représentation des résultats semi-quantitatifs pour la région Imbo Nord: contraste entre vertisols lithomorphes, topomorphes et les produits argileux d'altération du basalte (fraction <2µm, ES).

g) saturation au KCl: différenciation des smectites de transformation (Sm_T) et des smectites de néoformation (Sm_N) selon la séquence suivante:

KCl_N - KCl_{110} - KCl_{110EG}. (Annexe III.7: tableau 1).

En complément à l'examen en A.O de la fraction < à 2µm (E.S), une diffractométrie de poudre (sur roche totale) désorientée (p.d), a été réalisée.

Rappelons que l'échantillonnage a été conduit dans le but de vérifier si, oui ou non, il existe une distinction minéralogique entre "deux types" de vertisols localisés dans une même zone géographique. Le prélèvement a concerné:

- les vertisols dits lithomorphes;
- les vertisols topomorphes (liés à la dépression du lac Dogo-Dogo);
- les produits d'altération directe des basaltes (argiles vertes et produits d'altération ferralitique).

La caractérisation des minéraux smectitiques (de la fraction < à 2µm (E.S) et orientée), a été effectuée sur base de ces échantillons. Les résultats sont présentés dans des tableaux et figures. (Annexes III.4: tableau 1; III.9: tableau 1; Fig. 23).

Les figures suivantes montrent les profils diffractométriques respectifs des échantillons pour chaque type de prélèvement (*figs*. 24 à 26). Les conclusions suivantes sont tirées de ces figures:

- les argiles d'altération du basalte sont pratiquement monominérales. Elles renferment une smectite de néoformation (après test au K^+) très bien cristallisée (annexe III.6: fig. A) (V/P: 0,5 à 0,8; présence de réflexions harmoniques bien marquées), ainsi que des traces de kaolinite et d'illite.

La saturation au Li^+ identifie une nature béidellitique pour les smectites. Seul l'échantillon situé directement au contact du lit de gravier, porte une charge illitique de 10%. Cette illite, partiellement dégradée, est interprétée comme le produit d'un héritage provenant de la même source sédimentaire que les galets (diffractogramme de la figure 24);

- les vertisols "lithomorphes" possèdent exclusivement des smectites de néoformation. Ces dernières se caractérisent par une cristallinité apparente, globalement moins élevée (fig. 25) (V/P fluctuant de 0,8 à 0), ce qui les oppose aux argiles d'altération du basalte.

Le test au Li^+ indique également une nature béidellitique (ou du moins une béidellite ferrifère à nontronitique) ;

- les vertisols topomorphes (fig. 26) sont caractérisés par le même assemblage de minéraux smectitiques que les précédents, (toutefois en abondance moindre: 29% à 59% et une cristallinité assez basse: V/P< à 0,2) auquel s'ajoute un interstratifié irrégulier (10 -14Sm), une faible proportion de smectites de transformation (Sm_T) et une participation illitique et kaolinitique plus importante.

La saturation au Li^+ montre pour les vertisols topomorphes, un assemblage (50% - 50%) à montmorillonite et béidellite (ou nontronite).

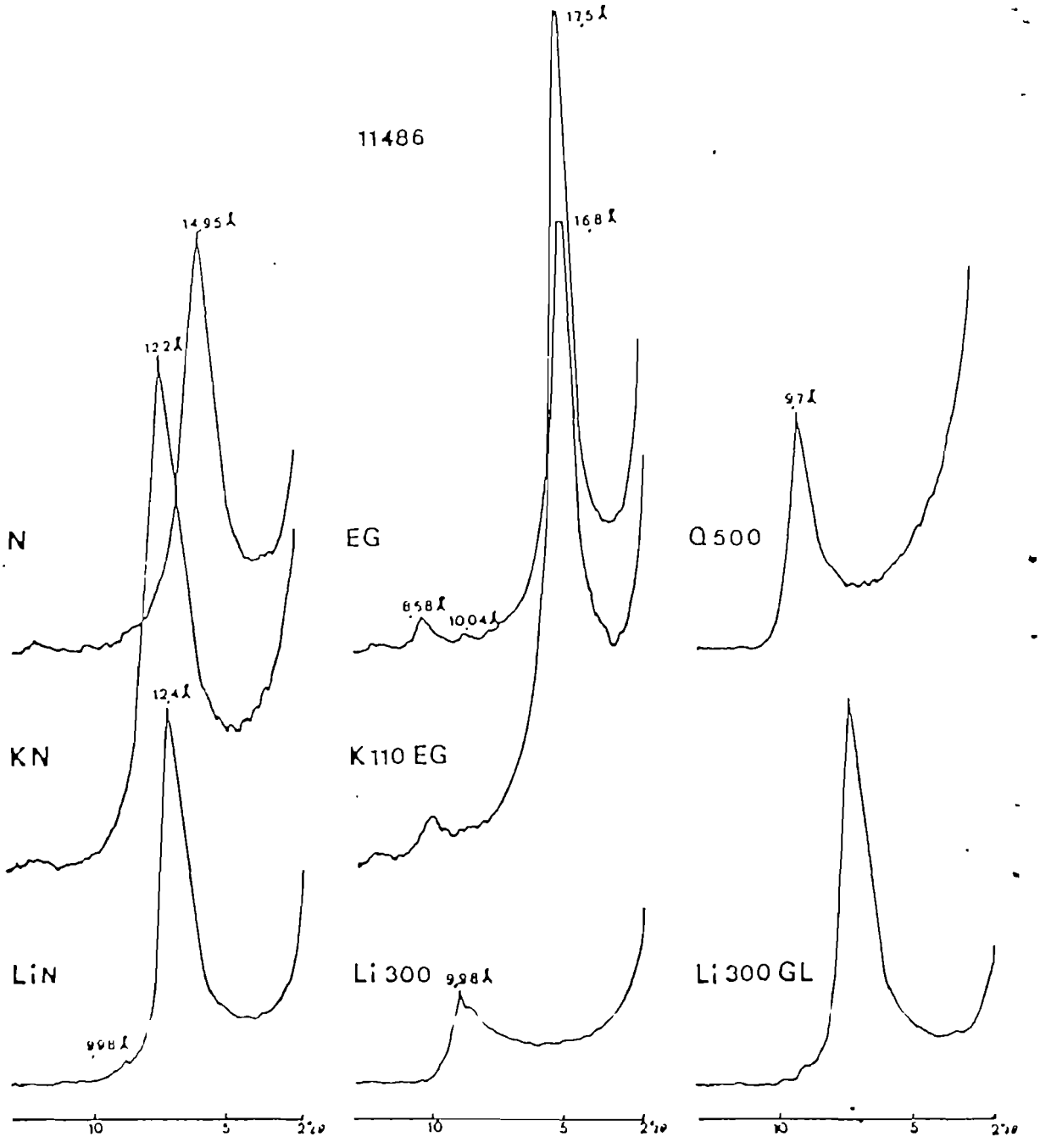


Figure 24. Profils diffractométriques d'une argile verte d'altération de basalte: comparaison des tests de routine (N, EG, Q_{500}) et après saturations au K^+ et au Li^+. Le premier post-traitement identifie une SmN, et le second caractérise une nature beidellitique pour les smectites. Fraction <2µm. Echelle horizontale en °2θ. On observe la très faible réflexion à 10Å de l'illite.

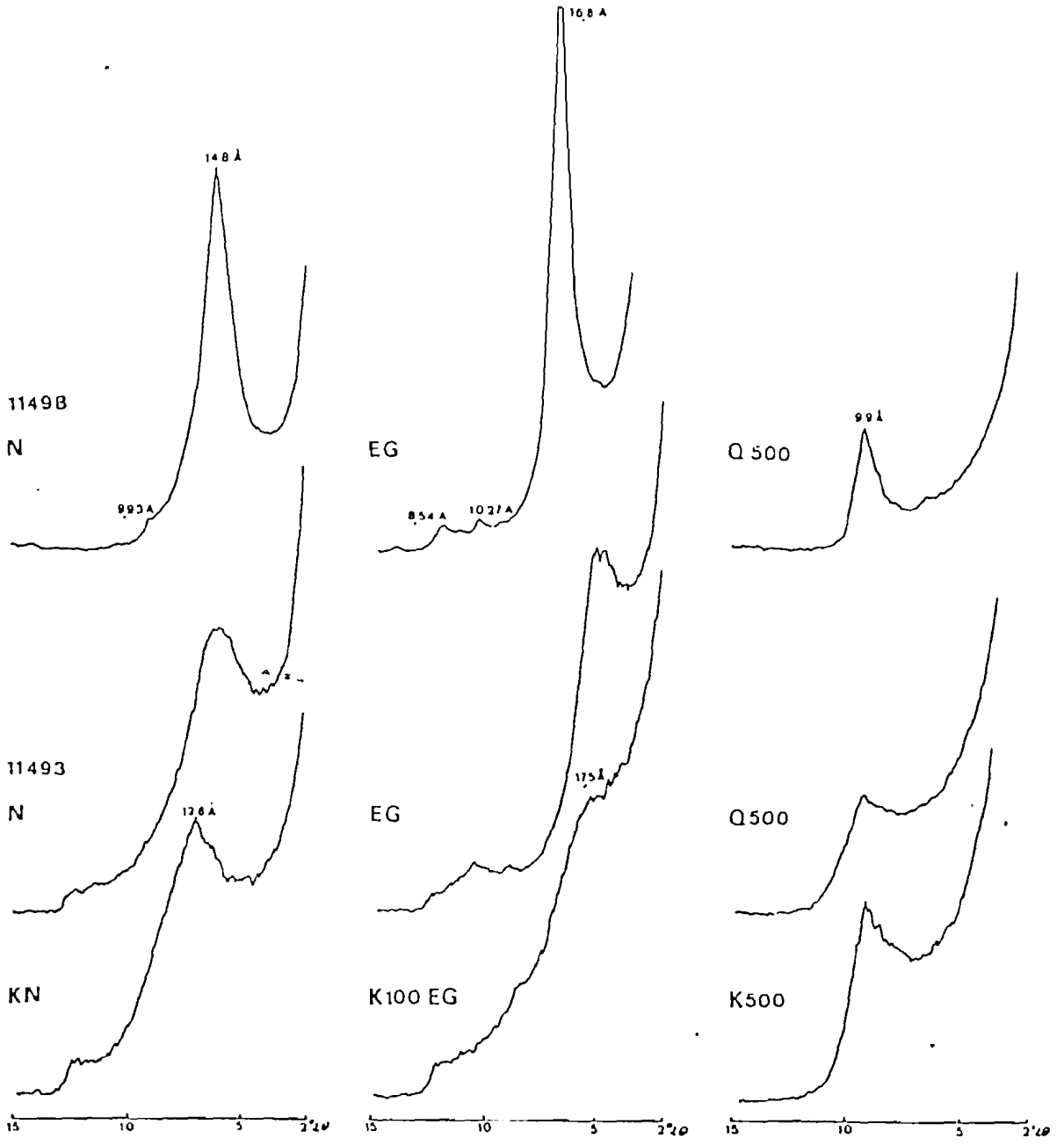


Figure 25 : Profils diffractométriques obtenus à partir de vertisols "lithomorphes" (Imbo Nord): comparaison des tests de routine (N, EG, Q_{500}) avec la saturation au K^+. On note la très faible participation des illites. Les smectites montrent après saturation potassique un assemblage à smectite néoformée dominante, accompagnée d'une faible participation de smectite de transformation (fraction <2µm (ES). Echelle horizontale en °2θ.

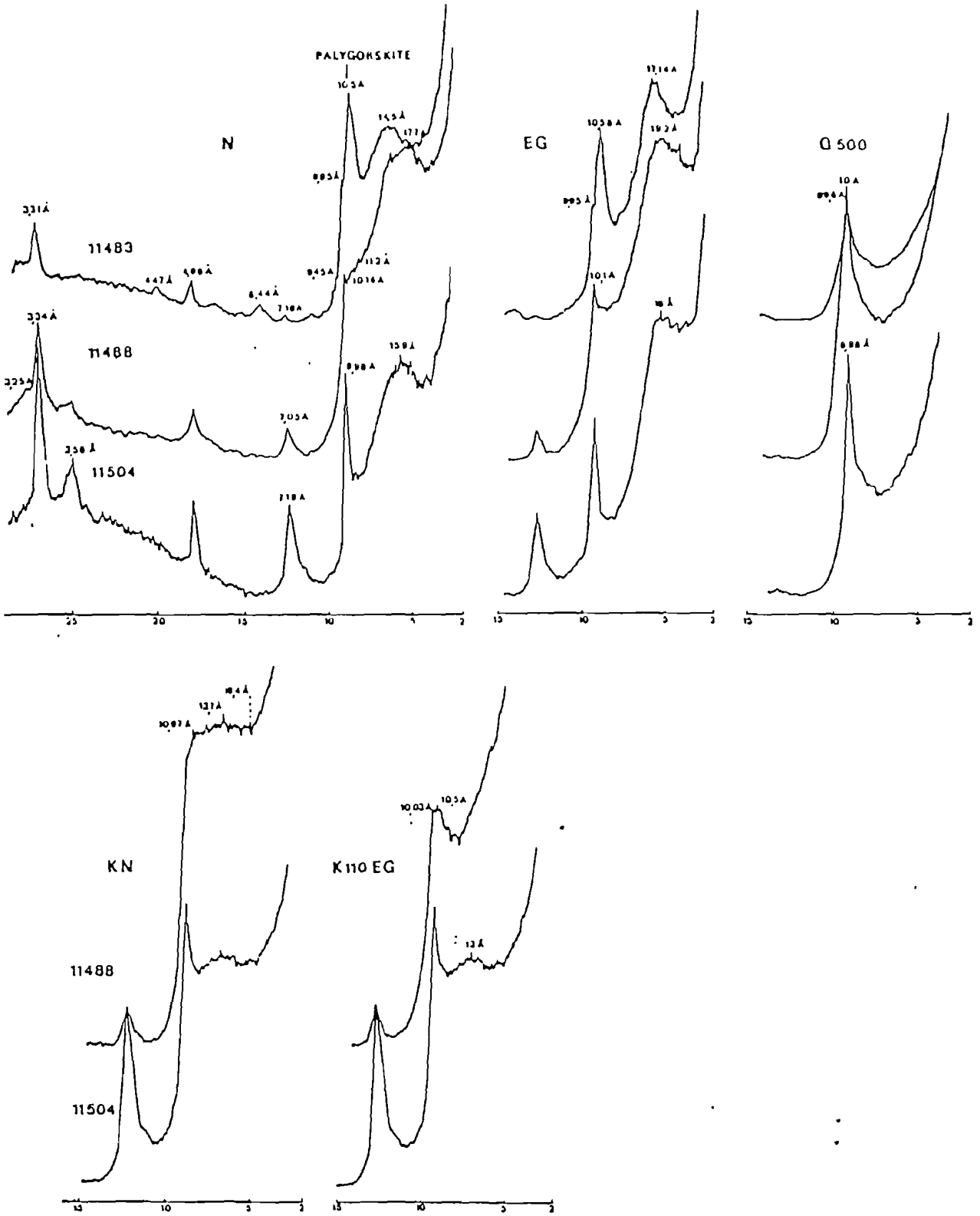


Figure 26 : Diffractogrammes représentatifs de vertisols topomorphes associés au lac Dogodogo. Un échantillon présente de la palygorskite (N°11483). Par comparaison avec les vertisols "lithomorphes", la participation illitique et kaolinique est plus importante et se marque sur diffractogrammes par des réflexions bien marquées, respectivement à 10 et à 7A. (fraction <2µm (ES)).
Echelle horizontale en °2θ.

Le tableau 6 synthétise quelques indications analytiques caractéristiques.

Dans les vertisols topomorphes, outre l'assemblage des minéraux argileux cités ci-haut, il a été identifié (dans un seul échantillon n° 1183) un minéral particulier: l'attapulgite (= palygorskite) (fig. 26). Dans l'échantillon porteur, prélevé à proximité immédiate du lac Dogo-Dogo, ce minéral abonde et se surimpose à l'assemblage habituel à smectite, illite et kaolinite.

	N°ULg	N°BUJA	Prof.(cm)	%Sm	%10-14Sm	SmN	SmT	V/P	Description lithologique et origine géographique.
Vertisol	11503	14.6	25-50	83,8	0,0	100	0,0	0,37	T_3 (Ouest RN.5):
"lithomorphe"	11502	14.5	50-80	80,2	0,0	100	0,0	0,45	Argile noire +
	11501	14.4	80-100.	83,5	0,0	100	0,0	0,72	Calcrète.
	11500	14.3	100-120	83,1	0,0	100	0,0	0,51	
	11499	14.2	120-140	81,5	0,0	100	0,0	0,54	
	11498	14.1	140-150	88,9	0,0	100	0,0	0,75	
	11493	11.1	0-20	76,1	0,0	20-30	70-80	0,11	T_4(Ouest RN.5):
	11494	11.2	60-80	75,5	0,0	20-30	70-80	0,00	Argile noire.
	11495	11.3	80-100	47,3	0,0			- 0,40	
Vertisol	11483	15	surface	41,7	0,0	100	0	,18	Côté occidental du lac Dogo-Dogo:
	11484	19	20-30	19,9	8,9	100	0	0,09	Argile noire à hydromorphie. Rive droite du canal drainant Dogo-Dogo: Argile noire graveleuse.
topomorphe	11492	10.6	25-50	50,8	7,1	10-20	80-90	-0,30	T_4 (dépression du
	11491	10.5	50-80	42,6	6,5	10-20	80-90	0,13	Dogo-Dogo):
	11490	10.4	80-100	38,4	11,0	100	0	-0,16	Argile noire à
	11489	10.3	100-120	47,7	9,4	100	0	0,00	hydromorphie.
	11488	10.2	140-150	52,6	6,5	100	0	0,12	
	11487	10.1	150-160	47,1	4,6	100	0	0,09	

	11505 11504	17.2 17.1	80-100 100-120	45,0 37,0	0,0 0,0	100 100	0 0	0,09 0,07	T_5 (sur rive droite de la source du Dogo-Dogo): Argile noire à hydromorphie.
	11482	9	-	63,4	0,0	100	0	0,17	Après T_4, 5m à gauche de la RN.5.
	11496	12.1	-	75,9	0,0	100	0	0,32	Au sud du pont frontalier de la Ruhwa, sur la RN.5.
	11497	12.2	-	29,6	9,6	100	0	0,15	Dans une carrière abandonnée, près de la RN.5.
	11485	1.1	-	83,7	0,0	100	0,0	0,73	Côté gauche de la RN.5 en avant de l'église de pentecôte de Cibitoke: gravière surmontant une argile verte d'altération du basalte.
	11486	1.2	-	90,9	0,0	100	0,0	0,81	Idem (en-dessous de 1.1).

	11480	6	-	90,7	0,0	100	0,0	0,72	Près de l'ancien pont de la Nya-magana: argile verte d'altération du basalte .
	11481	7	-	74,2	0,0	100	0,0	0,52	Cfr (6), avec un degré d'altération plus élevé.
	11479	3	-	7,3	2,0	-	-	0,17	Devant l'église de pentecôte de Cibitoke: produit blanc kaolinique.

L'étude diffractométrique en poudre désorientée (sur le matériau global) (annexe III.9: tableau 1) montre que les vertisols dits lithomorphes possèdent un contenu important en feldspaths, avec une participation très faible du quartz. Cela accrédite une origine basaltique des éléments nécessaires à la néoformation smectitique qui prédomine. Les vertisols topomorphes renferment par contre, une proportion plus importante de quartz (dû à un apport détritique).

II.1.6. Analyses chimiques.
(Annexe IV: tableaux 1, 2, 3, 4, 5; Fig. 27).

Les analyses chimiques ont été réalisées par voie humide et ont porté sur la seule fraction < à 2µm (E.S), extraite de dix échantillons très riches en smectites. Ces analyses couvrent les éléments majeurs et quelques éléments mineurs.

Les dix échantillons sélectionnés couvrent les vertisols dits lithomorphes (4 *éch*^{s}.), les vertisols topomorphes (2 *éch*^{s}.) et des argiles prélevées dans des produits d'altération directe du basalte (4 *éch*^{s}.).

La fraction analysée a été extraite par sédimentométrie des vertisols. Les résultats de l'analyse sont donnés en annexe IV (tableau 1) et repris dans la figure 27.

Des données analytiques sur les mêmes argiles smectitiques, reccueillies dans des travaux des pédologues, sont également présentés en annexe IV (tableaux 2, 3, 4 et 5).

L'analyse chimique ici présentée ne permet pas de qualifier avec précision la nature minéralogique

des smectites. La présence d'autres minéraux argileux rend délicat l'établissement de formules structurales strictes.

En outre, un certain nombre de limitations cristallochimiques entoure l'interprétation des analyses chimiques (Goemaere, 1991):

1° la présence d'autres minéraux non phyllosilicatés dans la fraction analysée;

2° la séparation entre smectite s.s et interstratifiés illite/smectite à feuillets smectitiques dominants;

3° la diffractométrie montre que l'assemblage smectitique est complexe, et que se mêlent dans les vertisols, des smectites qui diffèrent par leur origine (héritage, néoformation in situ), leur mécanisme de formation (néoformation, transformation) et leur chimisme (montmorillonite, béidellite ou nontronite);

4°la présence de matière organique, dont le taux élevé d'humification (C/N élevé) (Dulaunois, 1979) empêche son élimination par H_2O_2;

5° la présence de composé amorphe comme l'allophane (Dulaunois,1979);

6° la différence de poids, mesurée entre l'état de référence (110°C) et la perte au feu (P.A.F) (1050°C), est souvent assimulée à la perte d'eau. Cependant, tous les éléments volatils et ceux susceptibles de se décomposer dans cet intervalle de température, sont responsables de la perte de poids enregistrée. Parmi les impuretés, on peut citer les matières organiques, les carbonates et les sulfates (Caillère et al., 1982).

Le calcul de la répartition des ions dans la structure des smectites, n'a que peu de sens en raison des nombreuses approximations successives dues aux raisons ci-haut invoquées. Néammoins, des formules moyennes ont été calculées (en soustrayant illites et kaolinites et sans tenir compte de la P.A.F) et sont livrées dans le tableau 7. Elles permettent uniquement de globaliser la population smectitique et d'indiquer des tendances pour la fraction < à 2µm de ces sols.

On notera que l'occupation de l'espace interfoliaire des smectites des vertisols dits lithomorphes et des argiles d'altération du basalte, est dominée par les ions Mg^{++} et Ca^{++}; l'ion Na^{+} est minoritaire, conformément à la position vers 14Å de la réflexion (001) des smectites, dans des conditions de RH comprise entre 45 et 60% .

Les vertisols topomorphes montrent une participation sensiblement égale des cations Ca^{++} et Na^{+}.

Les vertisols dits lithomorphes, ainsi que les argiles d'altération des basaltes (ou en contact direct avec eux), contiennent plus de Fe^{+++} que les vertisols topomorphes. (Annexe IV: tableau 1). Dans le détail cependant, on y observe de larges fluctuations.

Après calcul du rapport $MgO + Fe_2O_3/MgO:Fe_2O_3$ exprimant les variations respectives des ions Fe et Mg dans les smectites (Lucas et Trauth, 1965, repris par Goemaere, 1991), les argiles d'altération du basalte se classent parmi les béidellites très ferrifères (voire proches du pôle non-

Tableau 7

Formules "moyennes" des smectites extraites de la fraction <2µm de vertisols.

11480 (1)	$Mg_{0.05}Ca_{0.09}Na_{0,07}$ $(Al_{1.46}Mg_{0.24}Fe_{0.30}{}^{3+}Fe_{0.01}{}^{2+})$ $(Si_{3.84}Al_{0.10}Ti_{0.06})O_{10}(OH)_2$	♦ ✚ ♠
11481 (1)	$Mg_{0.08}Ca_{0.04}Na_{0,01}$ $(Al_{0.49}Mg_{0.29}Fe_{1.17}{}^{3+}Fe_{0.05}{}^{2+})$ $(Si_{3.95}Al_{0.00}Ti_{0.07})O_{10}(OH)_2$	
11485 (1)	$Mg_{0,13}Ca_{0.06}Na_{0,02}$ $(Al_{0.49}Mg_{0.03}Fe_{0.65}{}^{3+}Fe_{0.02}{}^{2+}Mn_{0.00})$ $(Si_{3.54}Al_{0.37}Ti_{0.09})O_{10}(OH)_2$	
11486 (1)	$Mg_{0.05}Ca_{0.09}Na_{0,01}$ $(Al_{1.30}Mg_{0.14}Fe_{0.55}{}^{3+}Fe_{0.01}{}^{2+})$ $(Si_{3.69}Al_{0.17}Ti_{0.14})O_{10}(OH)_2$	
11487 (2)	$Ca_{0.02}Na_{0,02}$ $(Al_{0.80}Mg_{0.47}Fe_{0.71}{}^{3+}Fe_{0.02}{}^{2+}Mn_{0.01})$ $(Si_{3.98}Al_{0.12}Ti_{0.11})O_{10}(OH)_2$	
11489 (2)	$Ca_{0.03}Na_{0,02}$ $(Al_{0.80}Mg_{0.53}Fe_{0.71}{}^{3+}Fe_{0.03}{}^{2+}Mn_{0.01})$ $(Si_{4.02}Al_{0.00}Ti_{0.12})O_{10}(OH)_2$	
11493 (3)	$Mg_{0.15}Ca_{0.14}Na_{0,02}$ $(Al_{0.99}Mg_{0.08}Fe_{0.91}{}^{3+}Fe_{0.02}{}^{2+}Mn_{0.01})$ $(Si_{3.35}Al_{0.56}Ti_{0.08})O_{10}(OH)_2$	
11494 (3)	$Mg_{0.16}Ca_{0.13}Na_{0,01}{}^{3+}Fe_{0.01}{}^{2+}Mn_{0.01})$ $Al_{0.98}Mg_{0.05}Fe_{0.96}$ $(Si_{3.28}Al_{0.63}Ti_{0.09})O_{10}(OH)_2$	
11498 (3)	$Ca_{0.17}Na_{0,02}$ $(Al_{1.04}Mg_{0.52}Fe_{0.55}{}^{3+}Fe_{0.03}{}^{2+}Mn_{0,00})$ $(Si_{3.61}Al_{0.29}Ti_{0.10})O_{10}(OH)_2$	
11500 (3)	$Mg_{0,16}Ca_{0.08}Na_{0,02}$ $(Al_{0.99}Mg_{0.24}Fe_{0.75}{}^{3+}Fe_{0.02}{}^{2+}Mn_{0.01})$ $(Si_{3.57}Al_{0.33}Ti_{0.10})O_{10}(OH)_2$	

(1) argile en relation ± intime avec le basalte; .
(2) vertisols "topomorphes";
(3) vertisols "lithomorphes".
♦ : cations présents dans l'espace interfoliaire
✚ : distribution cationique en couche octaédrique
♠ : distribution cationique en couche tétraédrique

VERTISOLS DU BURUNDI.

DISTRIBUTION CHIMIQUE.

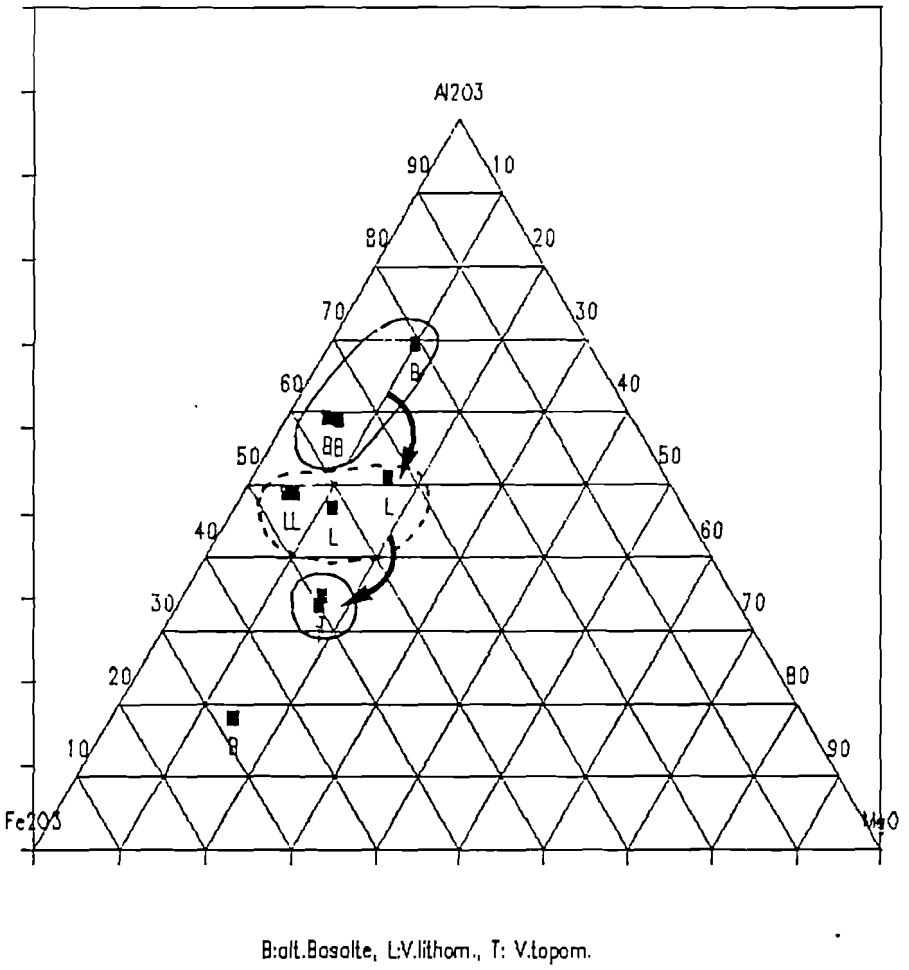


Figure N°24: Disposition des résultats des analyses chimiques dans un diagramme triangulaire Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MgO. Contraste entre vertisols "lithomorphes", topomorphes et les argiles d'altération du basalte. Un échantillon de nontronite est isolé à proximité du pôle Fe_2O_3.

tronitique pour l'échantillon 11481. Les smectites des vertisols "lithomorphes" se répartissent globalement en deux tendances: béidellites très ferrifères pour les argiles de la T_4 (transversal n°4) (11493 et 11494) et béidellites ferrifères-montmorillonites ferrifères pour les argiles prélevées sur la T_3 (11498 et 11500). Cette différenciation pourrait être liée à la proximité plus ou moins grande du substrat basaltique, et donc à son héritage géochimique (Goemaere, 1991).

La figure 27 de la représentation des analyses chimiques (illites et kaolinites déduits) dans un diagramme triangulaire (Al_2O_3-Fe_2O_3-MgO), montre une position intermédiaire des vertisols dits lithomorphes entre les produits argileux d'altération du basalte et les vertisols topomorphes. Une telle disposition fait penser à une filiation entre les trois types d'argiles smectitiques. L'ensemble des observations de terrain (II.1.3) exclut cependant une filiation "verticale" directe entre les vertisols dits lithomorphes et le basalte sous-jacent.

II.2. La région de l'Imbo-Centre. (Fig. 28; Fig. 29; Fig. 30).

II.2.1. Situation géographique. (Fig. 28).

Adossée à l'Est aux contreforts de la dorsale Zaïre-Nil et cernée à l'Ouest par la rivière Rusizi, la région de l'Imbo-Centre forme une plaine très mollement ondulée. On a une succession de "micro-bassins" fermés et de "micro-buttes" dans des zones presque planes. Les vertisols y occupent toutes les zones déprimées. Leur extension, particulièrement importante le long des principales rivières (Kajeke, Ninga, Mpanda, Musenyi, Muzazi), est très variable: quelques hectares ou dizaines d'hectares dans les dépressions sises en contre-bas des replats morphologiques; quelques ares dans les cuvettes du micro-relief, qui se dessinent sur ces mêmes replats.

Ces "bassins" sont temporairement inondés lors du débordement saisonnier des cours d'eau.

II.2.2. Contextes géologique et pédologique. (Fig. 28; Fig. 29; Fig.30).

Les vertisols de l'Imbo-Centre s'inscrivent dans des formations sédimentaires superficielles du fossé de la Rusizi. Ces dernières comprennent, outre des sédiments fluviatils et lacustres, le delta de la Rusizi (d'exondation récente) et les alluvions fluviatiles récentes à actuelles.

Les formations fluvio-lacustres sont principalement issues du démentèlement des roches précambriennes de la dorsale Zaïre-Nil (Cahen et Lepersonne, 1967) constituées par des roches métamorphiques (schistes cristallins, gneiss, amphibolites, pyroxénites, quartzites feldspathiques).

L'Imbo-Centre forme l'extension lacustre la plus importante du Burundi. Les dépôts lacustres (de plus de 20Km de largeur) résultant de la transgression-régression du Lac Tanganyika, sont succédés par des dépôts fluviatils qui remanient localement les sédiments lacustres anciens.

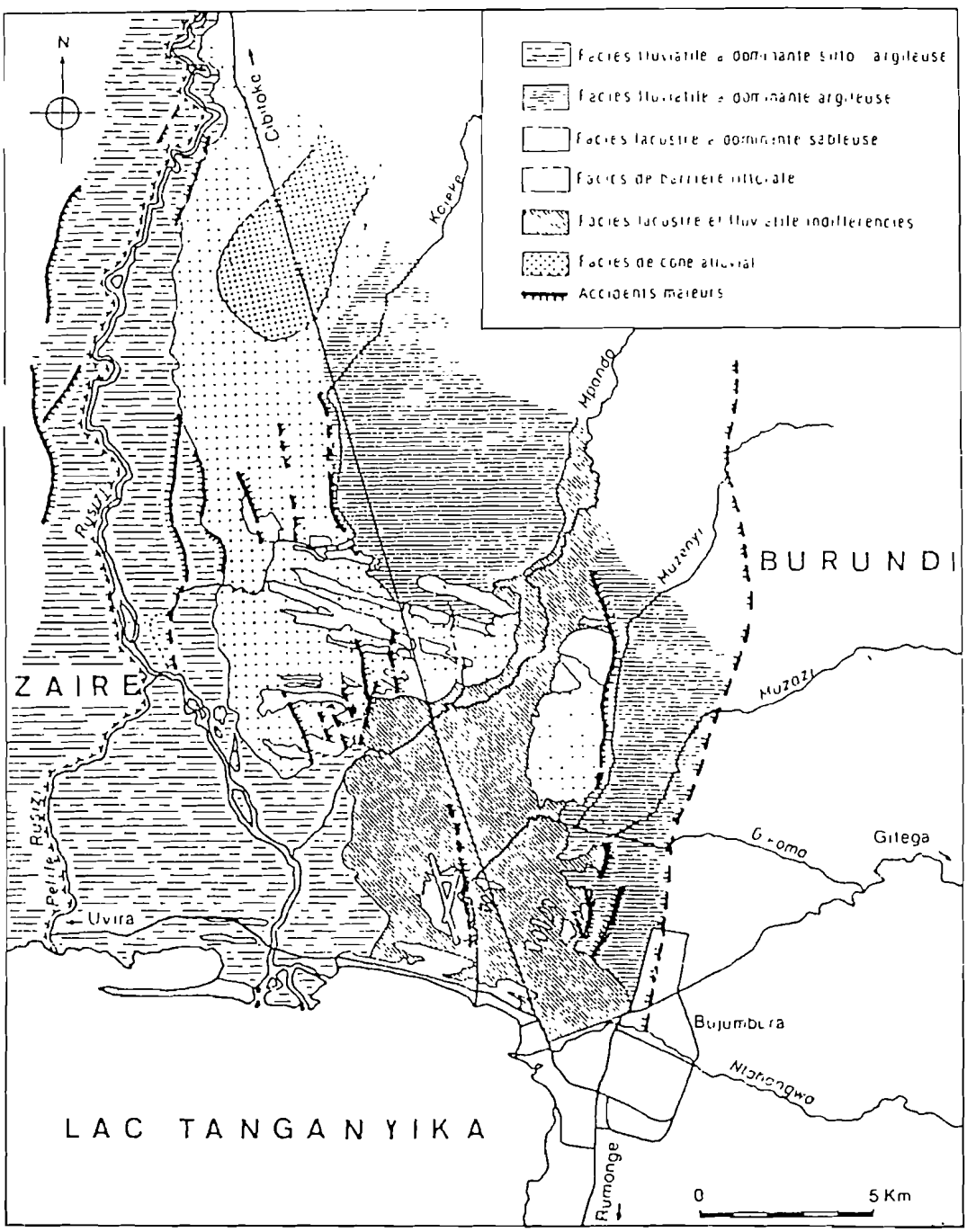
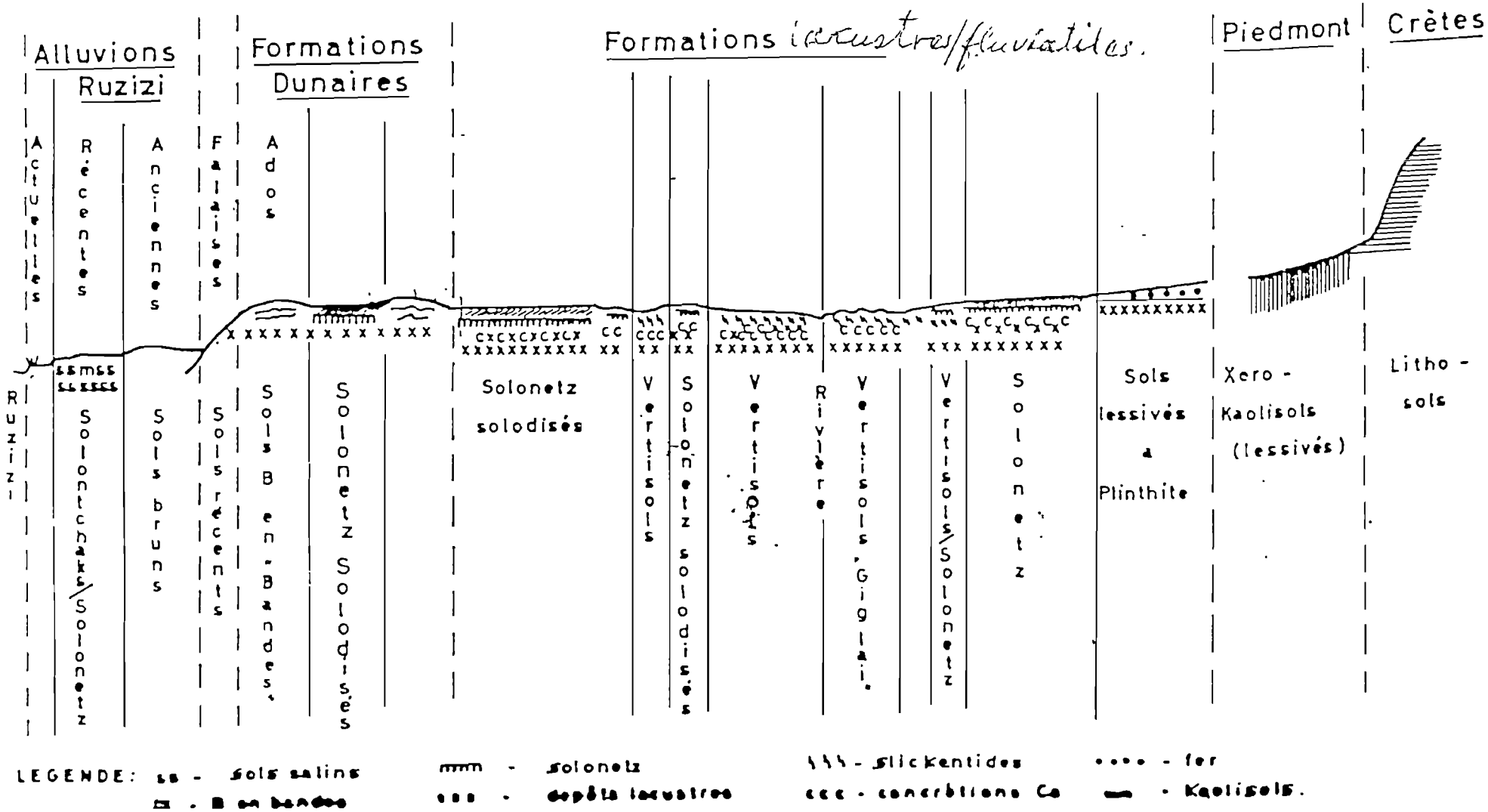


Fig. 28 : ÉBAUCHE SÉDIMENTOLOGIQUE ET TECTONIQUE DE LA PLAINE DE LA RUSIZI

BASSE RUZIZI

Fig. 30 . Unités pédologiques dans leur cadre géomorphologique



L'épaisseur des sédiments serait de l'ordre de 1500m à 2000m (Yzquierdo, 1960). Toutefois, des épaisseurs de plus de 3000m ont également été enregistrées dans certains bassins du Lac (Le Fournier et al., 1980).

La présence de "failles synsédimentaires", dirigées Nord-Sud, avec un rejet vertical faible et influençant la direction des rivières (Chorowicz et Thouin, 1985) dans la région, a conduit à une individualisation (fig. 28):

- à l'Est, d'une mosaïque de "dépressions" larges à fond plat où se développent des faciès à argiles noires.
- au centre, des dépôts lacustres (avec une épaisseur maximale de 1500m (Yzquierdo, 1960; Solaini, 1968));
- à l'Ouest, d'un couloir correspondant au cours actuel de la Rusizi et ses dépôts récents (partie avec une subsidence jugée la plus active par rapport à la partie orientale de la plaine (Chorowicz et Thouin, 1985)).

Cette tectonique de failles synsédimentaires est soulignée par l'existence d'eaux thermales qui expliquent le gradient géothermique anormalement élevé (>> 3°/100m) observé dans les sondages de AMOCO. On a également recensé ces eaux thermales dans la zone de Kabezi.

Les différents types de sols dont font partie les vertisols, sont le reflet de l'évolution du complexe sédimentaire fluvio-lacustre. (Fig. 29; Fig. 30).

II.2.3. Observations de terrain et description des profils. (Fig. 31; Annexes I.2.1; I.2.2; I.2.3).

Les travaux de terrain ont permis, non seulement d'apporter la précision des contours de pas mal de plages vertisoliques, mais aussi d'en cartographier d'autres, jusque-là inexistantes sur la carte pédologique au 1/50.000 de la S.R.D Imbo.

Les données de terrain totalisent cent cinquante points, dont quinze ont fait l'objet de mes observations (fig. 31). Quatre profils pédologiques (parmi quarante-sept, échantillonnés dans la région par un groupe de Pédologie de l'ISABU en cours d'une mission d'étude pédologique en 1964) ont été décrits (annexe I.2.2) et livrés à l'analyse (annexes II et IV). Trois puits, localisés dans les argiles noires de la zone de Gihanga, ont été décrits par G. Ngendakumana (Département de la Géologie) (annexe I.2.2). Enfin, cent vingt-huit sondages, dont la plupart ont été exécutés en 1960 en vue de l'alimentation en eau des paysannats de l'Imbo-Centre ou d'une reconnaissance du sous-sol, ont été effectués le long des routes transversales, tous les deux Km en principe. (Annexe I.2.3).

Toutes ces données de terrain convergent pour réveler l'allure lenticulaire et stratifiée des dépôts. En effet, malgré l'abondance et la proximité des sondages, il n'a pas été possible d'établir une

corrélation entre les différents terrains rencontrés sur base de la lithologie (argile noire, argile sableuse, sable, gravier, concrétions carbonatées).

Les levées alluviales sont caractérisées par une structure litée: les niveaux inférieurs sont riches en sables fins et siltites auxquels se superposent les argiles noires.

A l'intérieur même des horizons d'argiles noires, on observe des "micro-stratifications", c'est-à-dire de petits lits sableux ou silteux qui dessinent de belles structures laminaires (cfr diapositives 5, 6 et 7 en annexe I.2.1). Ces laminations sont disposées parallèlement au sens des cours d'eau (origine sédimentaire des argiles noires).

Dans les puits n°1 et n°3, on note une superposition d'une argile noire, avec de petits grains blancs de carbonates qui donnent des efflorescences avec HCl, sur une "argile blanchâtre", silteuse, micacée (présence de beaucoup de paillettes de muscovite) et beaucoup plus carbonatée que le niveau supérieur. En profondeur (à plus de 330cm), les carbonates, sous forme de concrétions indurées, forment des croûtes en rognons mêlées toujours à des paillettes de muscovite.

Le puits n°2 montre également la présence des grains de carbonates (donnant des efflorescences avec HCl) avec un granoclassement direct dans les argiles noires. Ces concrétions, indurées le plus souvent, ont des formes, des dimensions et une profondeur d'apparition très variables. Elles sont soit dispersées dans les profils, soit concentrées dans des horizons où elles forment parfois de véritables croûtes (caliches ou calcrêtes) (II.1.2). Ces dernières affleurent nottamment dans les zones à micro-relief gilgaï. Les vertisols de ces endroits sont caractérisés par leur compacité à sec (investigation difficile à la tarrière), leurs fentes de dessication et miroirs de glissement. Humides, ils sont massifs, plastiques et quasi-imperméables.

Des taches de rouilles (gley), diffuses ou nettes, d'intensité et de fréquence variables, sont dispersées dans tout le profil des argiles noires; ces enduits ferriques sont fréquemment localisés le long des canaux radiculaires.

Les profils pédologiques, décrits et prélevés par le groupe de Pédologie de l'ISABU, sont reportés dans l'annexe I.2.2.

Les données relatives aux sondages (annexe I.2.3) fournissent de bonnes indications sur la profondeur et les relations entre les argiles et les autres lithologies rencontrées (sables, graviers, calcaires) dans un même contexte pédologique.

Par ailleurs, des mêmes données et de mes observations de terrain, on note l'absence de roche-mère d'altération in situ. Cela implique le caractère allochtone des vertisols de la région. Comparativement à la région de l'Imbo-Nord, il convient de faire remarquer l'absence de vertisols associés à des roches basaltiques dans la zone de l'Imbo-Centre. Le caractère topomorphe est ici systématiquement bien mis en évidence par la position topographique des vertisols (basses plaines ou fonds de dé-

pressions) qui induit le mauvais drainage. Des strates (visibles dans les horizons des profils pédologiques ou en bordure des lits des cours d'eau) et des variations latérales de"faciès" (visibles par la coloration et la texture des horizons) sont observées.

Des intercalations de lits sableux fins et de siltites interstratifiées dans les argiles noires, sont observées à plusieurs endroits (Cfr diapositives n°6 et 7 en annexe I.2.1). Ce fait peut être lié à des conditions de crue lors des dépôts. Des niveaux de galets, souvent de roches métamorphiques, interstratifiés dans ces argiles noires, bien que rarement observés (annexe II.2.1: point 12) sont également présents. On note toutefois, l'absence de veritables "gravières" (II.1.3) dans cette région.

II.2.4.Analyses granulométriques. (Bulletins analytiques). (Annexes II.1; II.2: tableaux 8 et 9).

Trois échantillons (8; 10742; 10750) des argiles gonflantes ont été analysés à l'Université du Burundi, dans le service du Prof. Müller (Faculté des Sciences Appliquées). Les résultats sont donnés en annexe sous forme de courbes de distribution granulométrique (annexe II.1). Ceux-ci reflètent une variabilité (hétérogénéité) des matériaux dans leur granulométrie.

Par ailleurs, les données granulométriques des pédologues (figurant en annexe sous forme de bulletins analytiques) (annexe II.2: tableaux 8 et 9) montrent que le taux d'éléments fins (argiles et limons) est très élevé (> 70%), parfois atteignant 90%. Seuls les horizons superficiels sont parfois sablo-argileux.

II.2.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. (Annexes III.4: tableau 2; III.6: tableau 2; III.9: tableau 2; III.10:tableau 2; Fig.32; Fig. 33; Fig. 34).

Les échantillons pris pour analyses minéralogiques des smectites, ont été prélevés dans trois puits (puits RN.5; puits Nyeshanga; puits Ninga).

La figure 32 représente des diffractogrammes obtenus pour le puits RN.5. Il apparaît que:

- les échantillons prélevés à proximité de la surface, présentent une diminution de l'intensité relative des réflexions basales des smectites, indiquant une cristallinité moyenne. Du sommet vers la base du profil, les réflexions, d'abord plus larges, passent progressivement à des réflexions intenses et bien élaborées (raies fines). Souvent, ces réflexions sont déplacées vers les grands angles (12 - 14Å au naturel(N));
- la composante smectitique des horizons de surface, comporte essentiellement un interstratifié

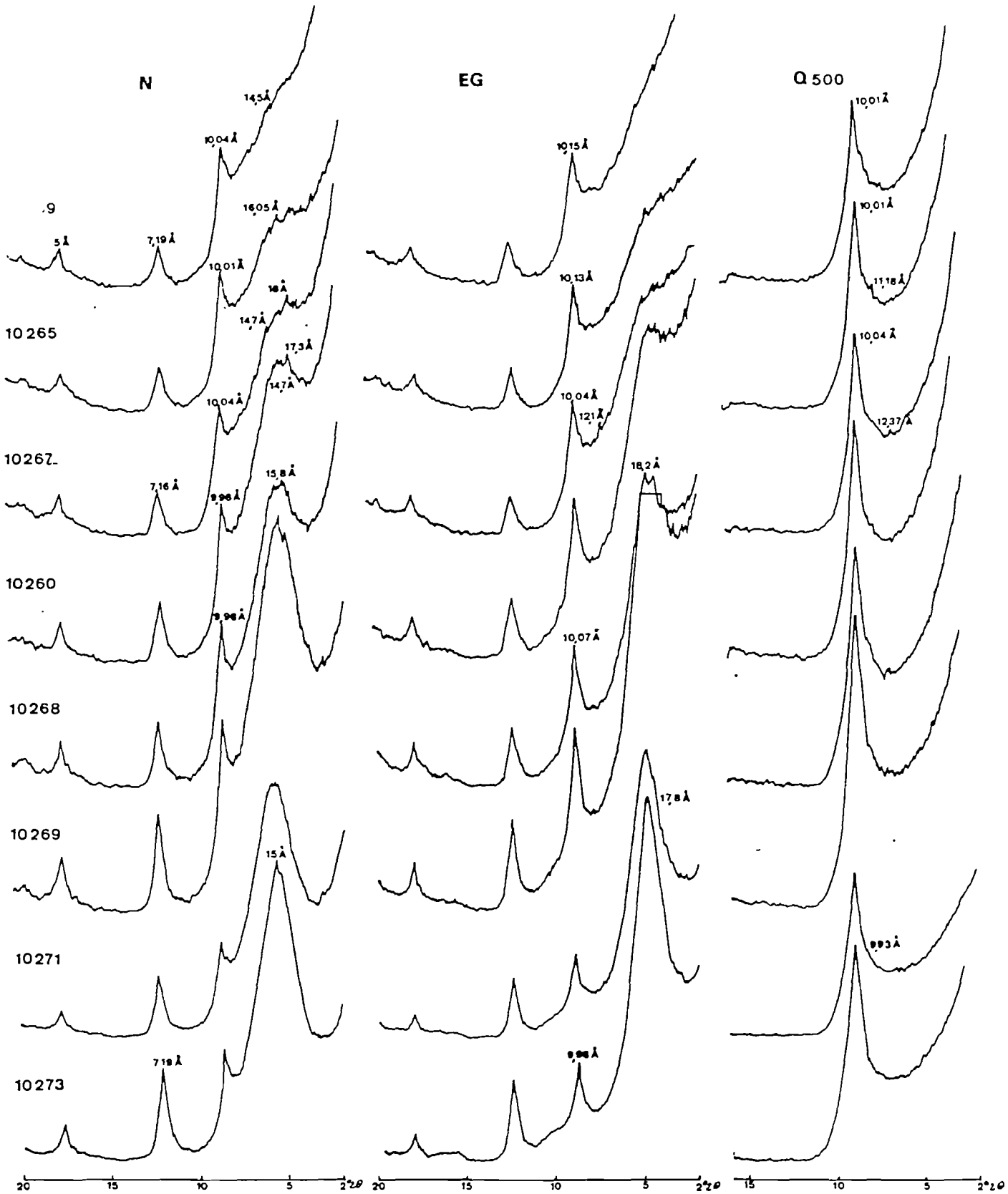


Figure N°39 : Echantillons du puits RN5 (Imbo Centre) classés (de haut en bas) en fonction de la profondeur croissante. Diffractogrammes enregistrés aux trois tests de routine (N, EG, Q_{500}) (fraction <2µm, ES). Echelle horizontale en °2θ

irrégulier à feuillets smectitiques dominants.

Pour les trois profils investigués, les résultats minéralogiques globaux (sur la fraction< à 2µm E.S) sont reportés dans le tableau 2 (en annexe III.4) et dans la figure 33.

- le puits RN.5 montre, de manière remarquable, l'enrichissement graduel en smectites vers la base du profil et la diminution corrélative des illites. La teneur en kaolinite reste pratiquement semblable à travers tout le profil. Cela montre que, dans ce puits, la smectitisation s'effectue aux dépens du stock illitique, ce qui fait penser qu'on doit s'attendre à y trouver des smectites de transformation (Sm_T).

La figure 34 présente la nature montmorillonitique des smectites du puits RN.5.

L'évolution latérale et verticale de la cristallinité des smectites, apparaît visiblement dans la figure B en annexe III.6.

Dans le puits RN.5, les smectites évoluent très remarquablement dans leur cristallinité: en partant des valeurs très basses au sommet (V/P < 0), caractérisant des smectites mal cristallisées, voire des interstratifiés irréguliers riches en feuillets smectitiques, ce rapport évolue graduellement vers des smectites de classe A à la base des argiles vertiques (V/P > 0) et au sein des argiles blanches du substrat.

Le puits Nyeshanga est caractérisé par des smectites relativement bien cristalliées (classe B), sans évolution verticale apparente de la cristallinité au sein des argiles noires. L'argile blanche de base présente les smectites les mieux cristallisées du profil.

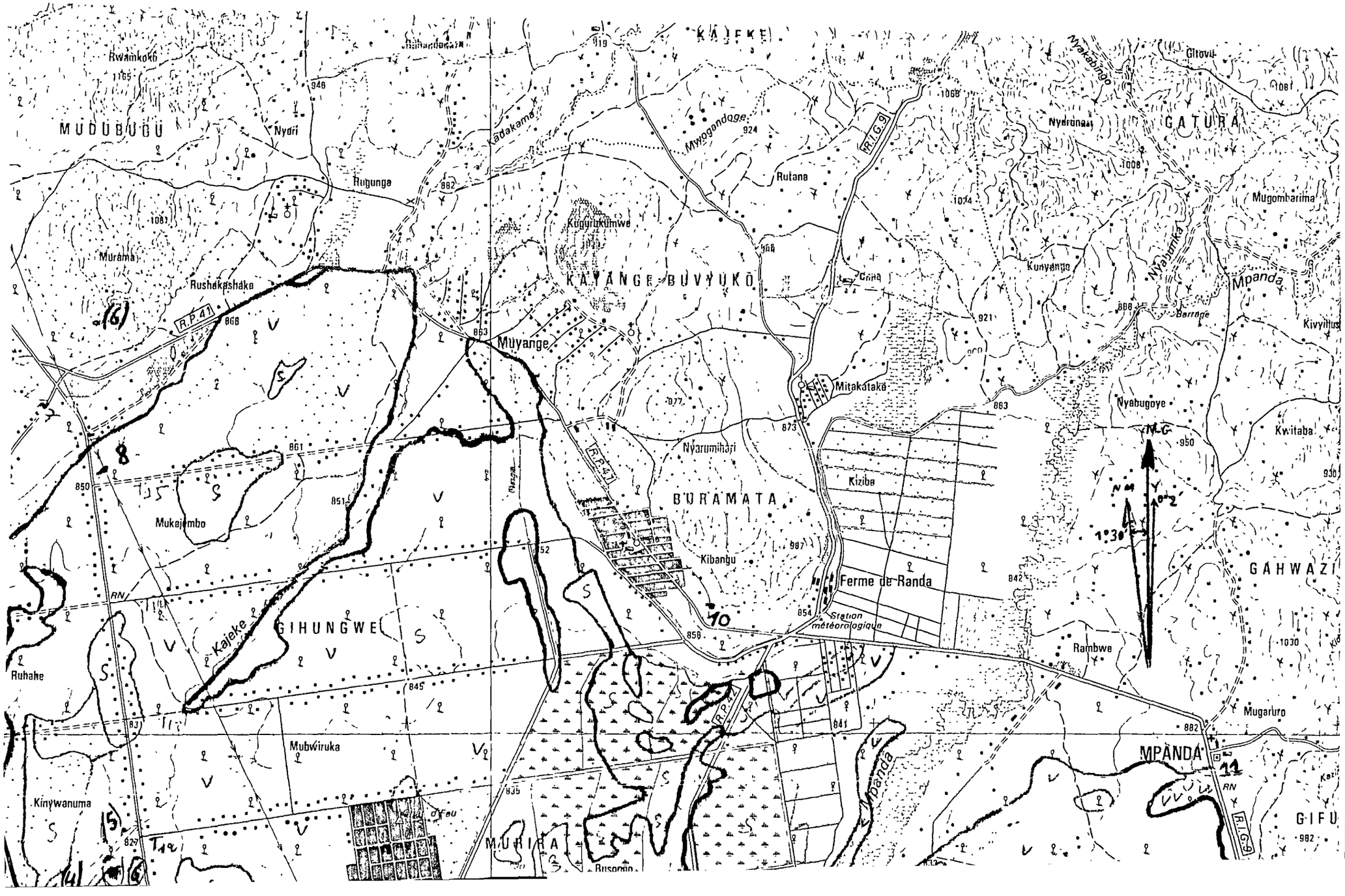
Le puits Ninga est marqué par des smectites et/ou des interstratifiés (10-14Sm) de classe E, sans évolution verticale apparente de la cristallinité. La base du puits présente des caractéristiques diffractométriques comparables à celles des deux autres puits décrits ci-haut.

La saturation au Li^+ montre la participation majoritaire de montmorillonite sur la composante béidellitique pour les trois puits (fig. 34).

Le test de saturation au K^+ indique une nette prédominance des smectites de néoformation (Sm_N) sur les smectites de transformation (Sm_T). (Annexe III.9: tableau 2).

A côté de l'assemblage smectitique, de la kaolinite et des illites, la présence du talc, bien que rare, est observée dans la fraction < à 2µm (E.S) dans les puits RN.5 (6,2%) et Ninga (2,6%) (mis en évidence par attaque au HCl 4N). En routine, l'occurrence du talc se corrèle positivement avec l'abondance du minéral illite s.l. Il serait l'expression d'un héritage en compagnie de l'illite (Goemaere, 1991).

La diffractométrie de poudre désorientée (le matériau global) révèle une participation importante (dans les proportions variables entre 30 et 70%) de minéraux non argileux dans la quantification


MUDUBUGU
Rwamkoko
Nyari
Rugunga
Murama
Rushakashaka
R.P.41
Kadakama
Mwogandoge
KAJEKE
Kugurukumwe
KAYANGE-BUYUKO
Muyange
Rutana
R.I.G.9
Nyakabingo
Gitovu
GATURA
Nyarunazi
Mugombarima
Kunyango
Nyabarika
Mpanda
Barrage
Kivyiliro
Cima
Mitakataka
Nyabugoye
Kwitaba
Nyarumihari
BURAMATA
Kiziba
Kibangu
Ferme de Randa
Station météorologique
GAHWAZI
Rambwe
Mugaruro
MPANDA
GIFU
Mukajambo
GIHUNGWE
Kajeke
Ruhahe
Mubwiruka
Kinywanuma
MUHIRA
Busongo
RN
N-S
1°30'
1°42'

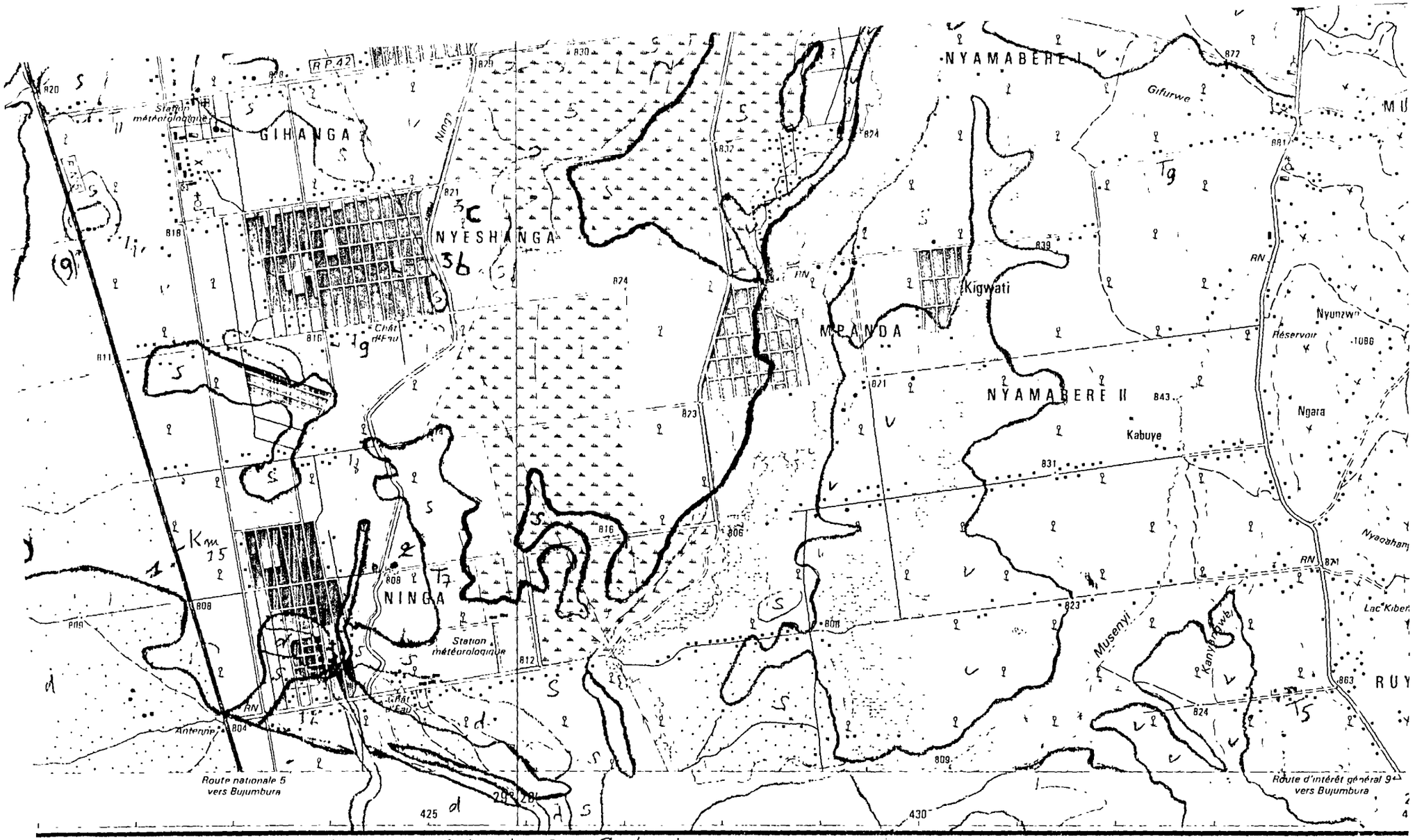


Fig. 31 : Carte des points d'observation (Imbo. Centre).
Echelle : 1/50.000.

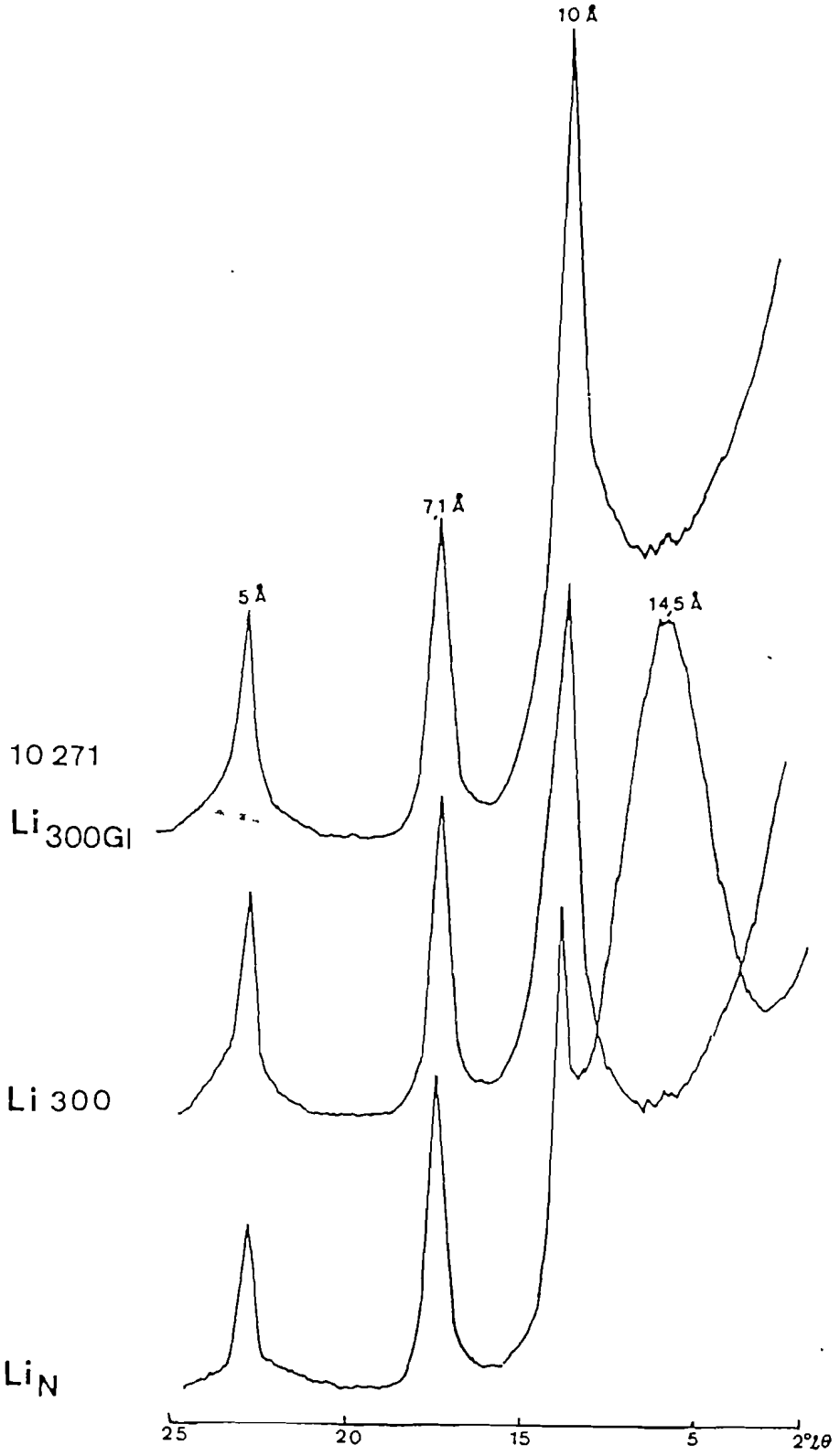


Figure 34 : Diffractogrammes présentant la nature montmorillonitique des smectites. Echantillon du puits RN5, Imbo Centre, (fraction <2µm, ES) Echelle horizontale en °2θ.

minéralogique du matériau smectitique. Les pourcentages en smectites (en tenant compte des proportions en quartz et en feldspaths) des échantillons analysés (puits RN.5) sont compris entre 20 et 30% (Annexe III.9: tableau 2).

II.2.6. Analyses chimiques. (Annexe IV: tableaux 9 à 12).

Il n'y a pas d'échantillons analysés chimiquement, mais nous disposons des données des bulletins analytiques pédologiques reccueillies à partir des travaux de Frankart et Herbillon (1971) sur les vertisols de la région. (Annexe IV: tableaux 6 à 10).

Ce sont des argiles riches en Mg^{++} et en Ca^{++}. Cela explique les grandes dimensions observées dans les agrégats, dû au fait que ces ions ont la particularité de favoriser la floculation.

II.3. La région de Bujumbura.

II.3.1. Situation géographique.

En fait, la région de Bujumbura appartient à l'Imbo-Centre (II.2). Elle est développée sur un glacis (Tack, comm.pers.) à l'extrême sud de l'Imbo-Centre.

Le résultat de la smectitisation se limite à des "pointements" relativement dispersés dans le milieu urbain, qui suscitent une attention particulière en raison des problèmes graves soulevés par la fissuration (dans les ouvrages du Génie Civil) liée à la présence de ces argiles gonflantes dans le sol et sous-sol. Leur extension géographique dans des sites à urbanisation croissante nous a motivé à séparer la région de Bujumbura du reste de l'Imbo-Centre.

Nous citerons en particulier les zones de **KAMENGE, KINAMA, KININDO, ROHERO** où ces argiles gonflantes ont été décrites (Müller; Laboratoire National des Travaux Publiques).

II.3.2. Contextes géologique et pédologique.

Contrairement aux autres zones à vertisols, qui sont bien documentées par les travaux cartographiques des agronomes de l'ISABU, le substrat de Bujumbura n'a jamais fait objet d'une cartographie ni d'un lever pédologique détaillé et systématique.

Le site urbain est construit sur un glacis "récent", constitué de sédiments détritiques issus de l'érosion des reliefs avoisinnants (les contreforts précambriens), avec, selon Ilunga, 1984, (repris par Goemaere, 1991) une contribution locale d'alluvions lacustres et fluviatiles d'âge Holocène. Ce glacis (formé en grande partie d'une alternance de couches d'argiles, de sables et, par endroit, de graviers) est recoupé par quelques failles récentes du Rift, qui se matérialisent par des abrupts dans le paysage. Ces derniers délimitent de petites dépressions favorisant le développement des



Figure 35: carte des points d'observation.

sols gonflants.

La surface limitée de ces petits bassins endoréiques rend malaisée une cartographie et lithostratigraphie détaillée de tels dépôts.

II.3.3. Observations de terrain et description de profils. (Fig. 35; Annexe I.3).

Dans la grande majorité des sites urbains, les argiles noires gonflantes sont masquées par une couche superficielle de sables argileux. Ainsi a-t-il été fait recours aux résultats des travaux de sondage effectués par le Laboratoire National des Travaux Publiques (L.N.T.P).

Cinq des nombreux profils décrits ont été sélectionnés pour montrer la présence d'argiles noires dans certains horizons (annexe I.5.1). Des niveaux (d'épaisseur variable) composés de graviers roulés enrobés dans de l'argile, sont observés.

Les mêmes observations sont également faites dans le puits H.R.K. (localisé près de l'Hôpital Roi Khaled) décrit par Ngendakumana. (Annexe I.3.2).

L'intercalation de niveaux détritiques dans des argiles noires, est l'image des variations dans les apports épisodiques constituant le glacis (Goemaere, 1991).

Les échantillons analysés (annexes III.2; III.3; III.4) proviennent de trois sites qui ont été prospectés. Il s'agit des quartiers (du Nord-Est vers le Sud-Ouest de la ville) de KAMENGE, ROHERO et KININDO).

Le quartier KAMENGE (puits Hôpital).

Le puits (dénommé H ou H.R.K) se situe au Sud de l'Hôpital Roi Khaled. Il a fourni dix échantillons sur une hauteur de 2,00m. Cinq autres échantillons proviennent du périmètre même de l'Hôpital.

Les quartiers ROHERO et KININDO.

Les trois échantillons, prélevés dans le quartier ROHERO, sont situés au centre de la ville de Bujumbura; deux autres échantillons seulement ont été prélevés en bordure du Lac Tanganyika (KININDO; INSS).

Le caractère compact des argiles gonflantes de la plupart des sites urbains, a souvent limité la profondeur d'investigation à la tarrière.

II.3.4. Analyses granulométiques. (Annexe II.1).

Sept échantillons (1 à 7) des sols gonflants, en provenance de sites différents du milieu urbain, ont été analysés.

- Trois échantillons (1, 2, 3) proviennent de **ROHERO.**

- Trois autres(4, 5, 6) ont été prélevés à **KAMENGE.**
- Un seul échantillon(7) a été pris à **KININDO (INSS).**

Les résultats ont été représentés en annexe sous forme de courbes de distribution granulométrique. (Annexe II.1). Ces dernières reflètent l'intercalation des niveaux sableux, voire graveleux, dans les argiles vertiques. La fraction détritique (sables et graviers) rend compte de l'importance des apports terrigènes.

II.3.5. Analyses minéralogiques aux Rayons-X. (Annexes III.4: tableau 3; III.6:tableau 3; III.9:tableau 2; III.10; Fig.36; Fig.37).

Vingt échantillons ont été sélectionnés et couvrent trois zones à savoir:

1° **KAMENGE** quartier Kamenge (cinq éch.); puits pharmacie, près du Centre Hospitalo-Universitaire (dix éch.).

2° **ROHERO** trois échantillons pris dans un puits à une maille verticale de 1m.

3° **KININDO** (quartier INSS): deux échantillons (16 et 17).

Les résultats analytiques semi-quantitatifs (sur la fraction< à 2µm E.S. et orientée) reportés en annexe III.4 (tableau 3) sont repris dans la figure 36.

Les différents sites étudiés ne se différencient guère dans leurs évolutions minéralogiques semi-quantitatives. Les proportions relatives des trois minéraux argileux principaux (smectites-kaolinites- illites) sont plus ou moins équivalentes (avec une légère dominance des smectites).

La figure 37 visualise nettement les fluctuations quantitatives verticales pour chaque site. Ces variations sont à mettre en rapport direct avec les variations lithologiques. Le contenu en smectites fluctue entre 25 et 45% pour le puits pharmacie(H).

Dans le site **ROHERO**, le processus de smectitisation s'effectue surtout dans les horizons superficiels; la teneur en smectites y est supérieure à 50%, tandis qu'il y'a un "enrichissement" en kaolinites et en illites en profondeur.

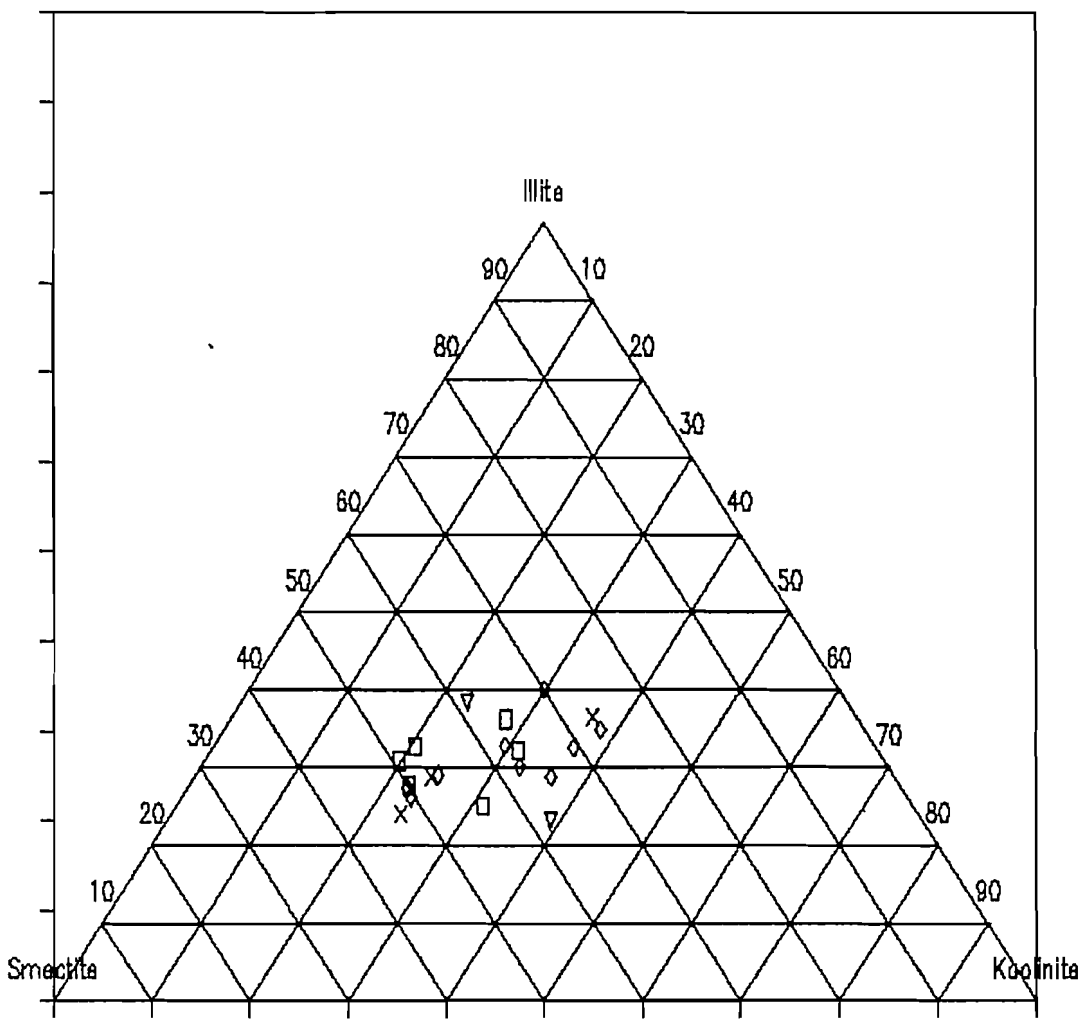
Le site **KININDO** présente 25% de smectites et un contenu variable en illites et kaolinites.

Après saturation au KCl et mesure des intensités des réflexions à chaque étape du post-traitement (KCl_N- KCl_{110C}-KCl_{110CEG}), les résultats de la quantification des Sm_T et des Sm_N sont présentés en annexe III.9 (tableau 2) et repris dans le tableau suivant:

Fig 36 : Diagramme triangulaire de représentation des résultats semi-quantitatifs pour la région de Bujumbura.

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

ANALYSE QUANTITATIVE: fraction <2µm.



BUJUMBURA

KAMENGE ◊ NINGAPHARMACIE × MOHERO ▽ KININDO

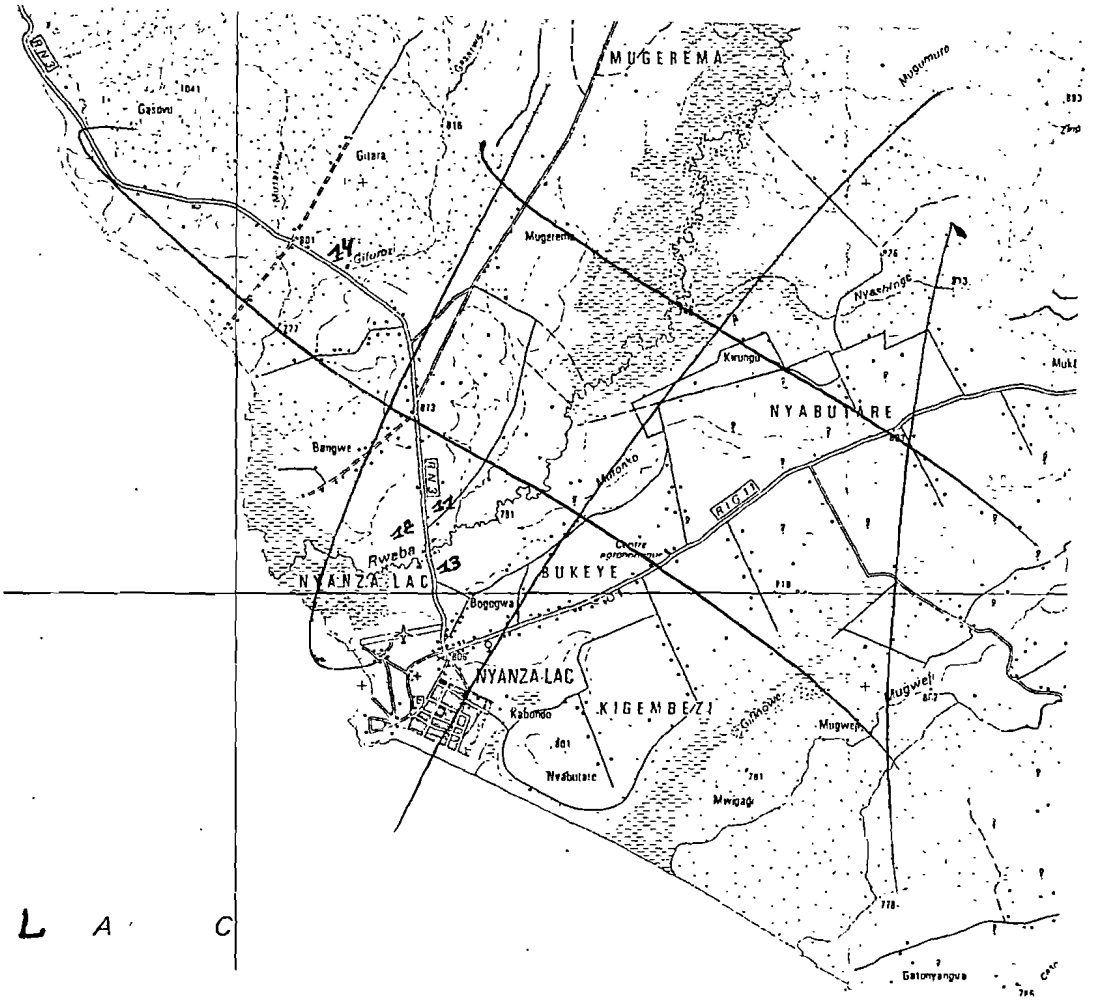
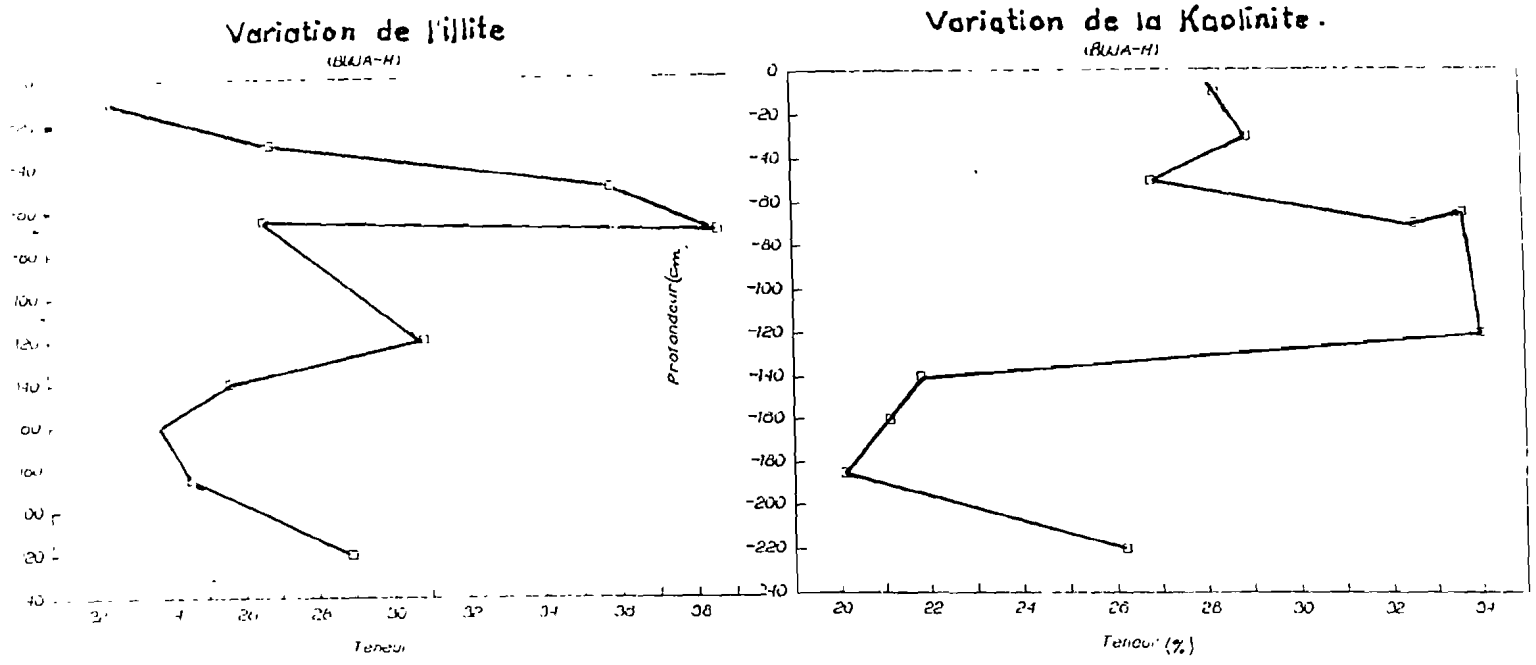
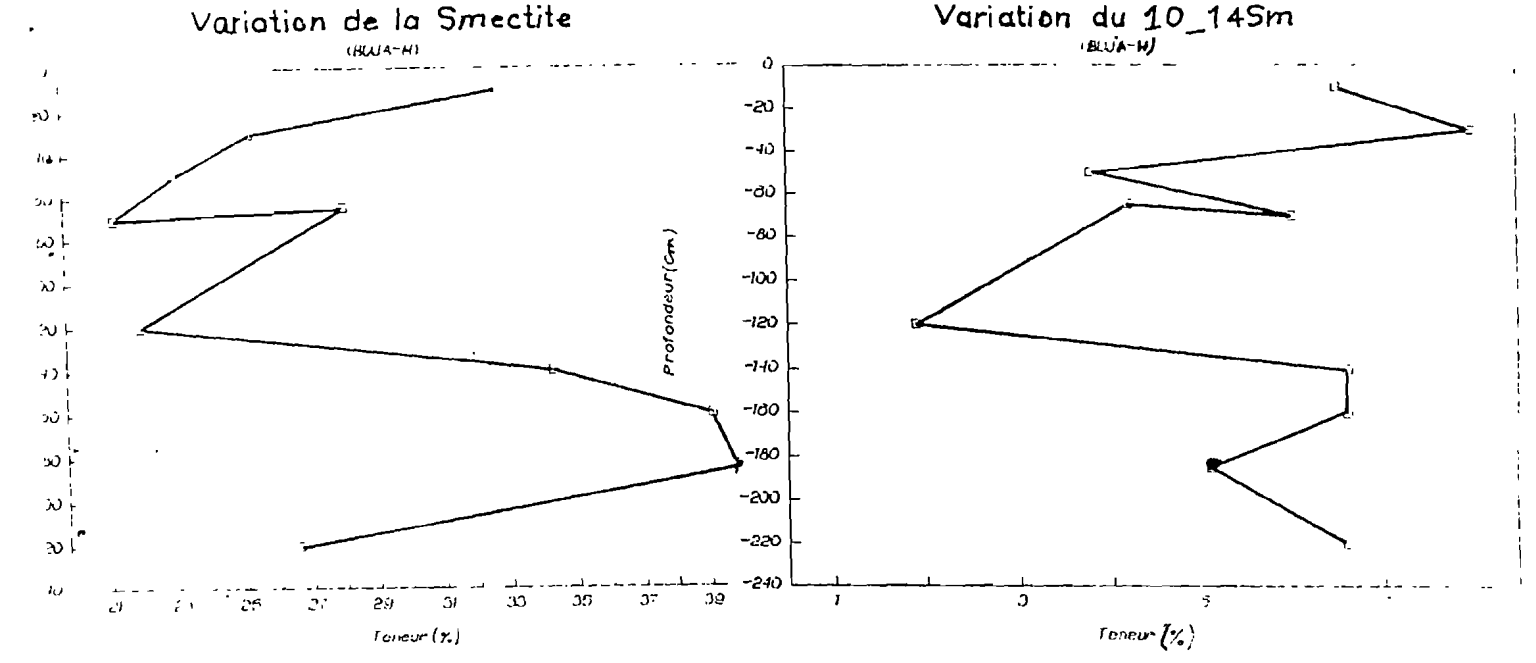
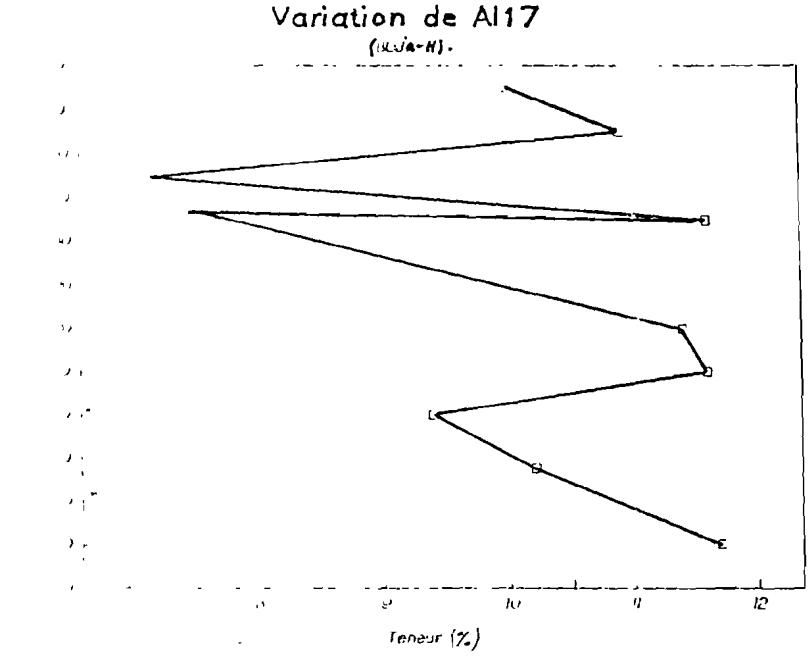

MUGEREMA
Gasovu
Gitara
Gitwrot
Mugeremi
Musumuro
Nyashinge
Kwungu
NYABUTARE
Bangwe
Mutanko
RIGIT
Rwebe
NYANZA LAC
BUKEYE
Bogogwa
NYANZA-LAC
KIGEMBE/I
Kabondo
Nyabutare
Mwigaga
Mugweli
Gatomyangwa
11
12
13
L A C

Fig. 37 : Fluctuation minéralogique en fonction de la profondeur.







N°	Origine	Sm_T	Sm_N	Sm_T vs Sm_N
9371		73	27	$Sm_T \gg Sm_N$
9372	KA	51	49	$Sm_T \gg Sm_N$
9373	ME	34	66	$Sm_T \geq Sm_N$
9374	NGE	36	64	$Sm_T < Sm_N$
9375		66	34	$Sm_T > Sm_N$
10609	RO	54	46	$Sm_T \geq Sm_N$
10610	HE	42	58	$Sm_T < Sm_N$
10611	RO	26	74	$Sm_T \ll Sm_N$
10737	PHAR	41	59	$Sm_T < Sm_N$
10740	MACIE	29	71	$Sm_T \ll Sm_N$

Tableau 7: Résultats du calcul des proportions relatives des Sm_Tet des Sm_N au sein de la population smectitique extraite de la fraction argileuse (fraction< à 2µm, E.S).

Dans le matériau argileux global (après diffractométrie sur poudre désorientée de la roche globale), la quantification relative des minéraux constituants fait apparaître une participation (de 10 à 30%) de minéraux non phyllosilicatés (le quartz et les feldspaths, avec accessoirement de la calcite). (Annexe III.9: tableau 3). C'est dans le matériau smectitique global que s'individualisent au mieux les variations des teneurs en smectites vis-à-vis des autres contaminants (illites, kaolinites et minéraux non argileux).

II.3.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques).

Aucune analyse chimique n'a été faite sur les smectites de Bujumbura. Rappelons toutefois qu'en

fait, ce site urbain fait partie intégrante de l'Imbo-Centre (II.3.1).

II.4. La région de Rumonge.

II.4.1. Situation géographique.

D'une extension assez limitée, la zone smectitisée de la région de Rumonge se situe dans une petite dépression dite dépression de la Kagoti (d'origine probablement tectonique). Celle-ci se localise juste en contrebas des collines précambriennes, entre les Km 78 - Km 78,5 de la Route Nationale n°3 (RN. 3) (route Bujumbura-Rumonge-Nyanza-Lac).

La dépression n'est pas totalement fermée. Elle présente un exutoire aux eaux de la rivière Kagoti vers la Murembwe. En saison sèche, elle constitue un milieu pédogénétiquement relativement "confiné", favorable ainsi à la génèse des smectites.

Actuellement, la dépression de la Kagoti est mise en valeur par la culture du riz.

Au-delà de la dépression de Kagoti, on note l'absence de bassins favorables à la néoformation et au développement des smectites. Là où une plaine alluviale lacustre existe, elle est très étroite (un peu moins de cent mètres de largeur) et sans dépressions endoréiques.

II.4.2. Contextes géologique et pédologique. (Fig. 38).

La zone smectitisée s'inscrit dans une "plaine" littorale étroite de sédiments holocènes, le long du Lac Tanganyika. Elle est limitée vers le Nord par des formations du précambrien. La carte géologique indique l'existence d'une grande faille, parallèle à la rive Est du Lac Tanganyika et sépare la plaine des contreforts du Rift.

Les matériaux constitutifs de la zone sont essentiellement des "dépôts alluvionnaires fluviatiles/lacustres". Cette désignation est due au fait qu'il s'agit de formations géologiques dont les processus d'apport n'ont pas pu être identifiés comme strictement fluviatils ou strictement lacustres. Cependant, leur différenciation pédogénétique faible, ainsi que l'absence de dénivelée significative avec les alluvions fluviatiles actuelles pourraient témoigner de leur origine plus récente que les transgressions lacustres, donc en faveur d'une hypothèse d'apport de type fluviatil.

Dans le cas précis de la petite dépression de la Kagoti, l'origine fluviatile paraît évidente: les matériaux argileux s'y sont accumulés pendant les saisons de pluie à l'occasion de l'écoulement entravé de la Kagoti dans son petit bassin.

Ces matériaux, généralement stratifiés, avec des textures très variables, présentent souvent des

Photo : Région de Rumonge (dépression de la rivière KAGOTI).

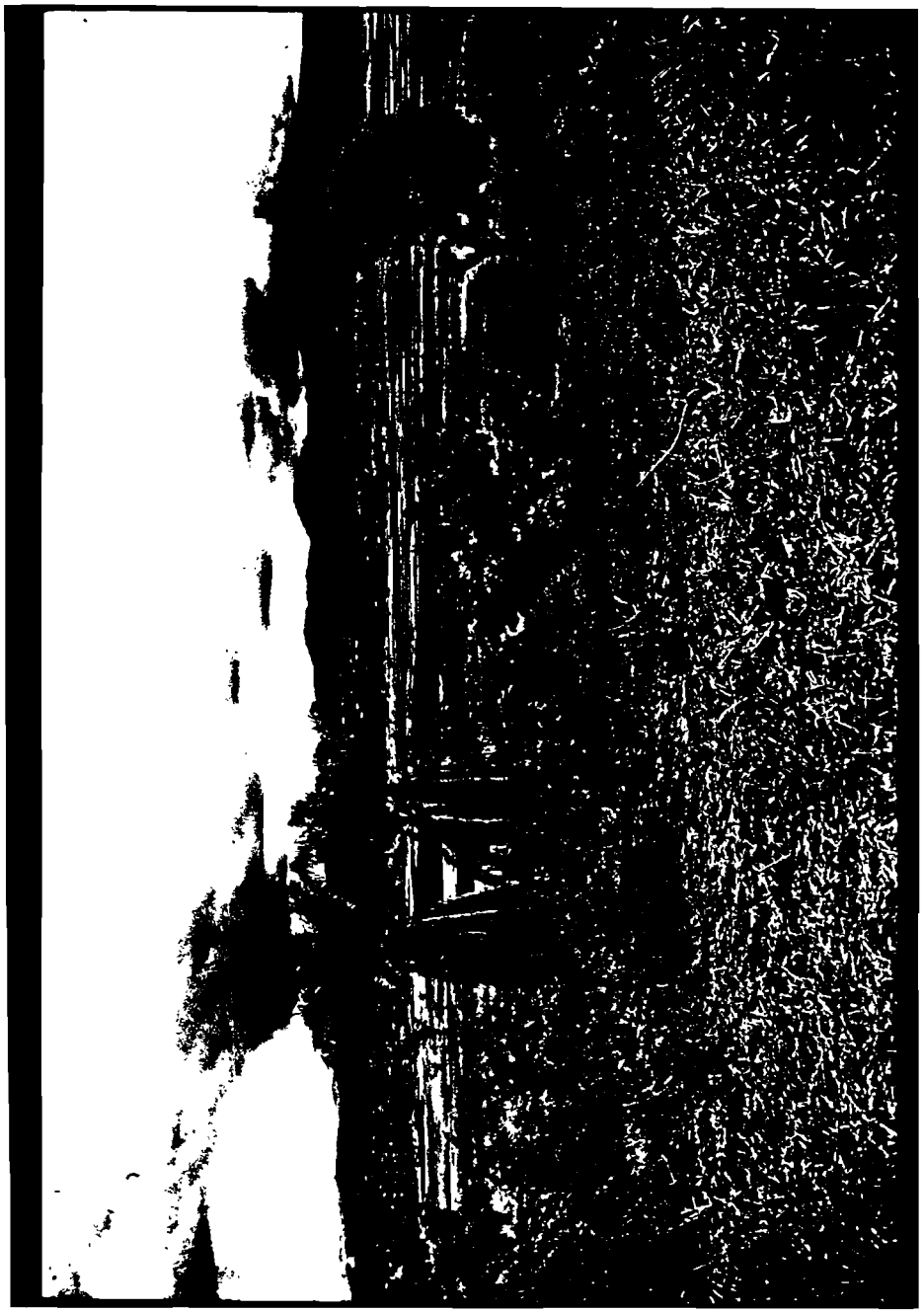
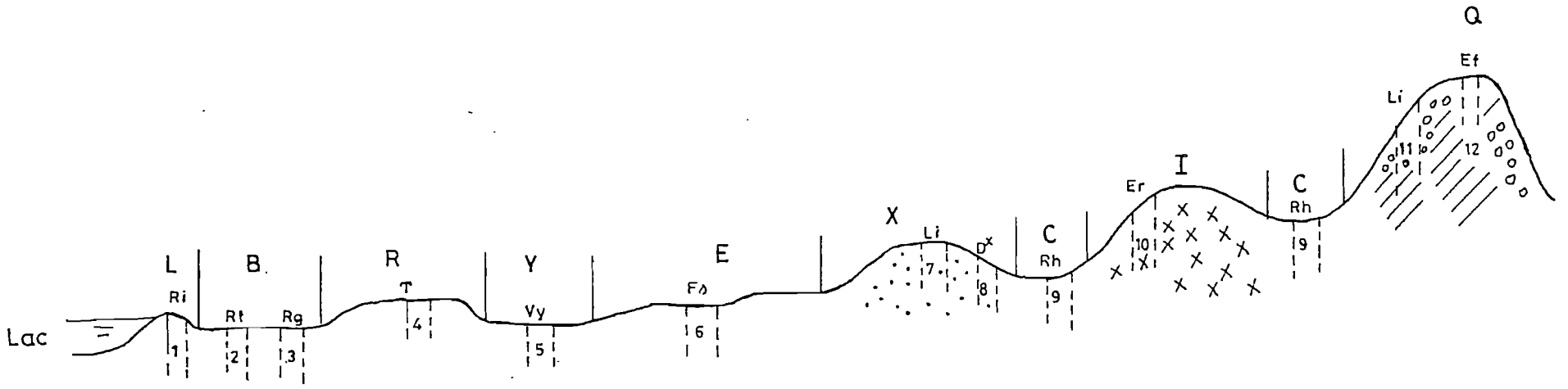


Fig. 38 : REPARTITION SCHEMATIQUE DES SOLS AU NORD DE LA KATETE (Bloc RUMONGE)
(COUPE EST-OUEST)



LEGENDE

L : Plages et dunes lacustres actuelles.
B : Alluvions fluviatiles/lacustres récentes, réduites.
R : Anciennes berges lacustres.
Y : Matériaux de dépression hydromorphe en relation avec des alluvions fluviatiles actuelles.
E : Surfaces d'aplanissement.
X : Matériaux d'origine géologique complexe.
I : Matériaux dérivés de micaschistes.
Q : Matériaux quartzitiques

Ri(1) : Régosol lithique (graveleux).
Rt(2) : Régosol typique.
Rg(3) : Régogley.
T(4) : Sol récent textural.
Vy(5) : Vertisol hydromorphe.
Fλ(6) : Ferrisol faiblement ferrisolique.
Li(7) : Lithosol.
Dˣ(8) : Régogley lithique.
Rh(9) : Régosol humique (kaolinitique).
Er(10) : Ferrisol intergrade sol récent.
Ef(12) : Ferrisol intergrade ferralsol.

traces d'hydromorphie temporaire ("gley").

La figure 40 montre, d'une manière schématique, la répartition des principales familles de sols qui forment le contexte pédogénétique des vertisols et des sols vertiques de la région.

II.4.3. Observations de terrain et description de profils. (Annexes I.4.1; I.4.2; I.4.3; Fig. 39).

Les observations faites au point 15 (fig. 39; annexe I.4.1) sont complétées par la description et l'échantillonnage d'un profil pédologique (ISABU) (annexe I.4.2) et de deux puits 15A et 15B (Ngendakumana) (annexe I.4.3). Ces deux puits sont situés dans la dépression marécageuse du bassin de la Kagoti. Ils sont implantés à proximité de la RN.5, au PK 78, sur le côté Est de la route (fig. 39).

L'échantillonnage comporte quinze (pour 15A) et seize échantillons (pour 15B) prélevés à une maille de 20Cm sur une profondeur de 3,00m.

Dans les profils argileux, on note la présence de passées sableuses, épisodiques et ponctuelles, interprétées comme des intercalations sédimentaires plus grossières, déposées par les cours d'eau traversant ce petit bassin endoréique.

II.4.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques). (Annexes II.1; II.2: tableau 10).

Les résultats (bulletins) relatifs à la granulométrie des argiles noires, sont présentés en annexe II (tableaux 10 et 11). Ils ont été reccueillis à partir d'un document de l'ISABU relatif à l'"étude pédologique du projet Rumonge (1981)". Les analyses granulométriques ont été fournies par J. Gourdain et C. Vermeulen (Laboratoire de Chimie Agricole de l'ISABU).

Par ailleurs, deux échantillons (10701; 10709) en provenance du puits Kagoti (KaB.15), ont été également analysés (Müller, Université du Burundi). (Annexe II.1).

Les courbes cumulatives en annexe II.1 présentent un faciès semi-logarithmique. Ces courbes sont décalées vers des sables plus grossiers en profondeur. Ces décalages sont suffisamment significatifs pour confirmer l'existence d'une stratification.

II.4.5. Analyse minéralogique.
(Annexes III.4:tableau 5;III.6:tableau 4; III.9:tableau 2; III.10; Fig.40; Fig. 41).

Trente-deux échantillons, prélevés dans le bassin de Kagoti, ont été analysés: seize échantillons ont été pris dans le puits KaA.15; quinze autres dans le puits KaB.15; un seul (9368) a été pris en dehors des puits.

Les tableaux (Annexes III.4: tableau 5; III.6: tableau 4; III.9: tableau 2; III.10) et la figure 40 fournissent l'ensemble des données aux Rayons-X (résultats qualitatifs et semi-quantitatifs des différents échantillons, en agrégats orientés, fraction< à 2µm E.S et en poudre désorientée sur le matériau global).

La fraction argileuse (< à 2µm E.S et orientée) est caractérisée par le même cortège minéralogique que les sites précédents, à savoir les smectites- kaolinites- illites comme minéraux principaux.

Les résultats semi-quantitatifs montrent que le site est plus remarquable par le pôle kaolinique qui y caractérise le contenu argileux (fig. 40; fig. 41).

Les smectites apparaissent mieux cristallisées dans le puits 15A que dans le puits 15B. (Annexe III.6: fig. C). Dans le premier, on observe, de haut en bas du profil, une séquence continue, depuis des smectites mal cristallisées (classe E de Thorez, V/P < 0) vers des smetites graduellement mieux cristallisées.

La courbe de variation verticale du rapport V/P des smectites du puits 15B (fig. 42), montre que les deux premiers échantillons (dans le niveau sablo - argileux superficiel) sont caractérisés par des smectites relativement bien cristallisées. Sous le niveau sableux, la courbe observée est similaire à celle du puits 15A.

La composante montmorillonitique (saturation au Li^+) domine dans les deux puits. (Annexe III.7: fig. 2). La proportion de (10-14M) est plus importante au sommet des deux profils et à la base du puits 15B.

De manière générale, une évolution en parallèle est observée entre l'indice V/P et la teneur en montmorillonite s.s, par opposition avec les proportions des interstratifiés (10-14M) et (10-14Béi).

La saturation au K^+ indique que les smectites du sommet des profils sont des smectites de néo-formation (Sm_N), passant vers la base à une prépondérance des smectites de transformation (Sm_T). (Tableau 8).

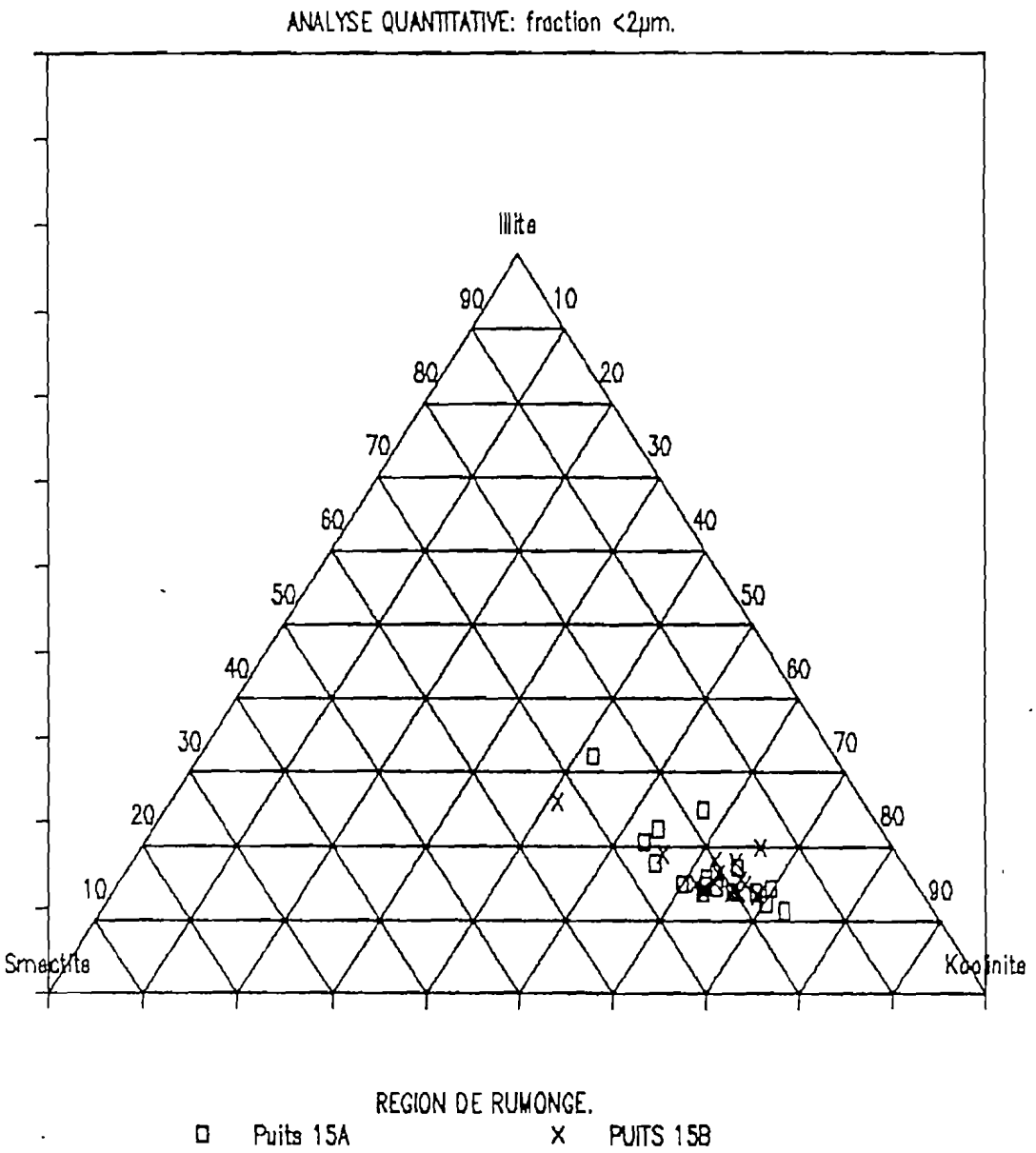
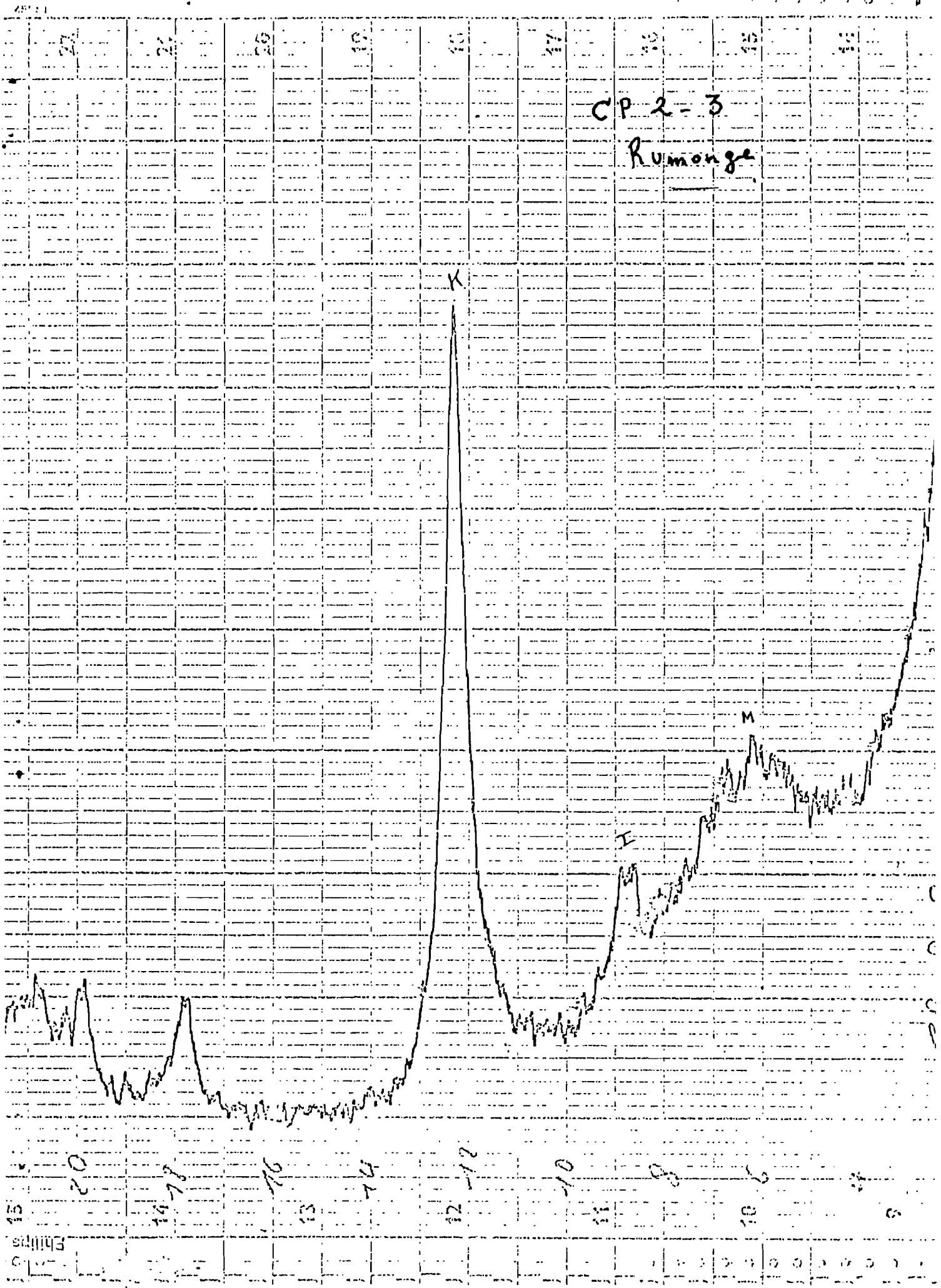
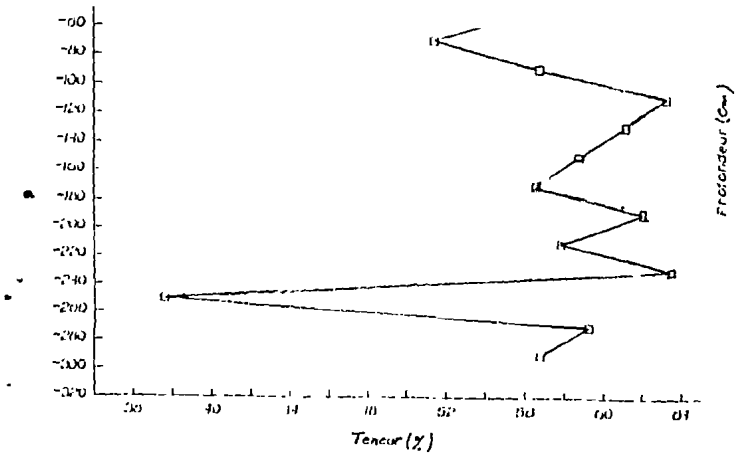
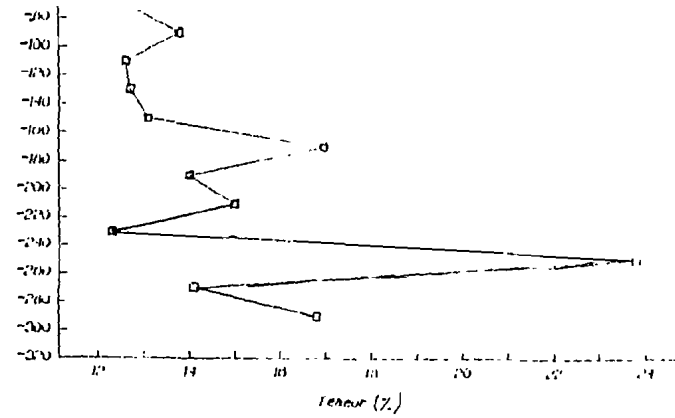


Figure N°13: Diagramme triangulaire de représentation des résultats semi-quantitatifs pour la région de Rumonge: les puits 15A et 15B. (fraction <2µm, ES).

Fig. 41

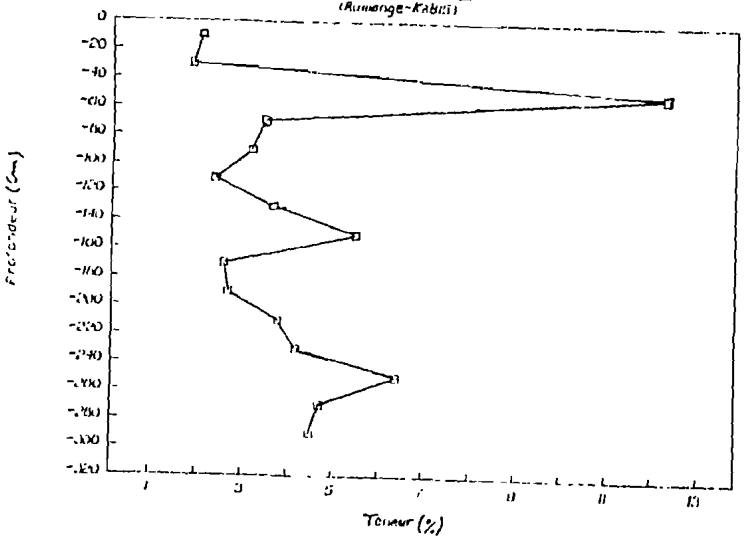






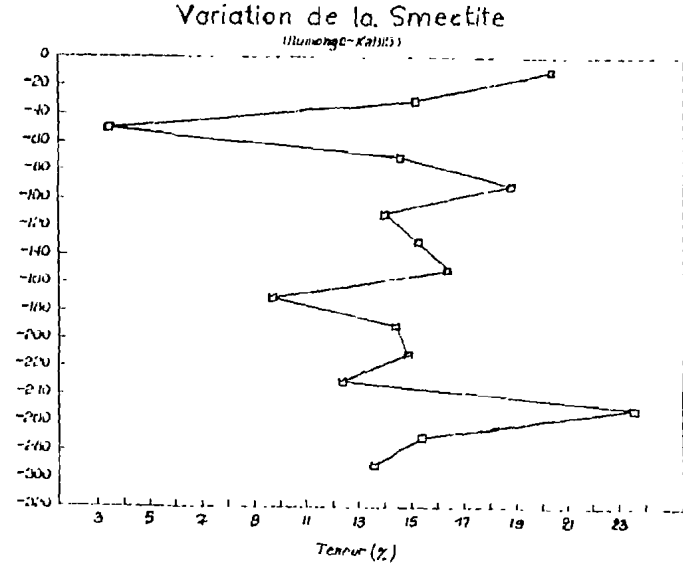
Variation du 10_14Sm

(Rumonge-Kabili)



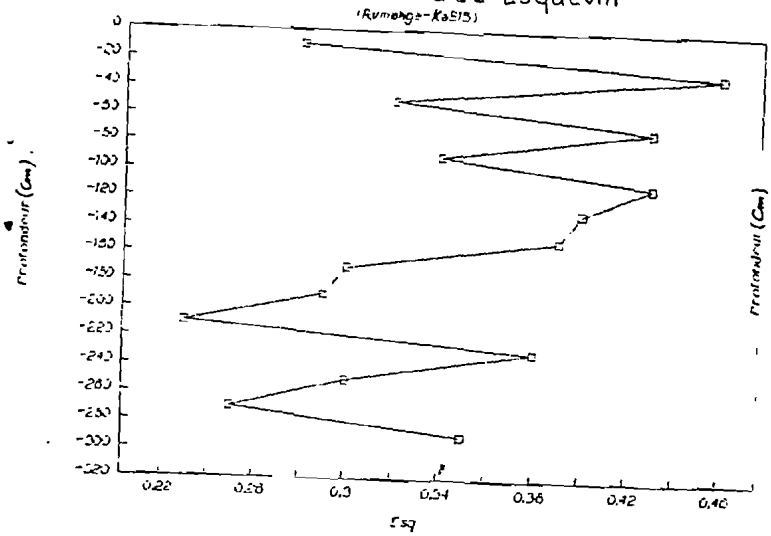
Variation de la Smectite

(Rumonge-Kabili)



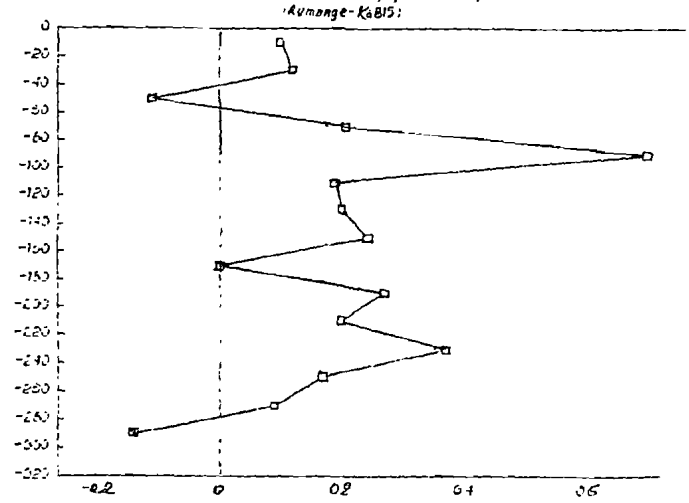
Variation de l'indice Esquevin

(Rumonge-KaBI5)



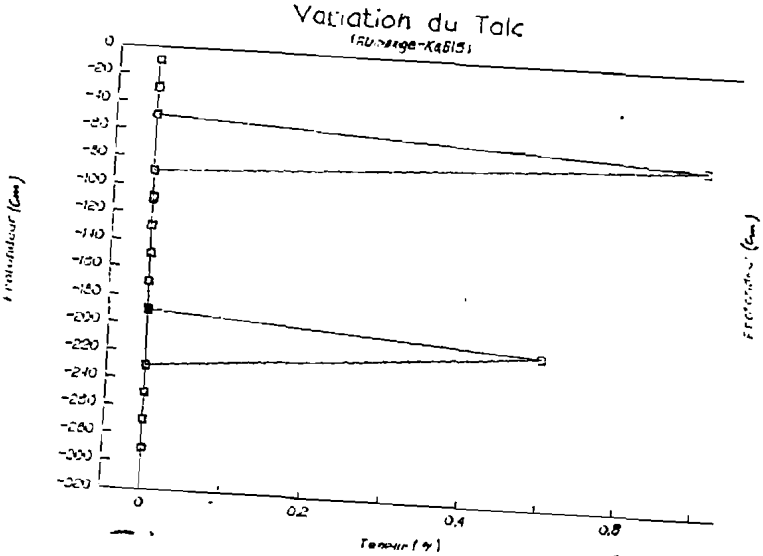
Variation du rapport V/P

(Rumonge-KaBI5)



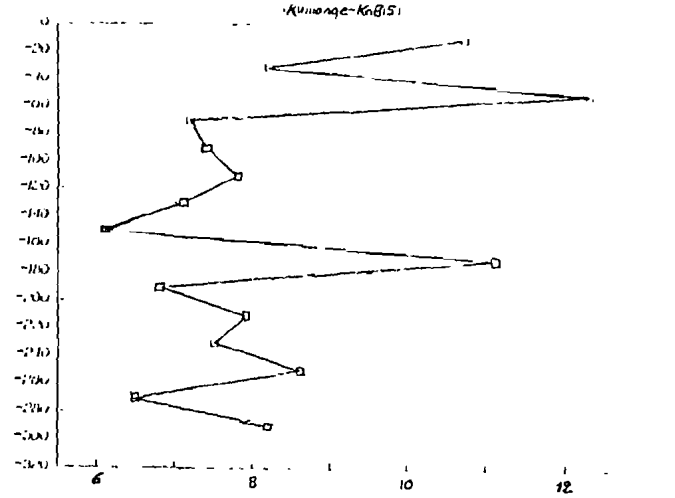
Variation du Talc

(Rumonge-KaBI5)



Variation de Al17

(Rumonge-KaBI5)



N°	Puits	Sm_T	Sm_N	Sm_T vs Sm_N
10222	15A	16	84	$Sm_T \ll Sm_N$
10226	15A	59	41	$Sm_T > Sm_N$
10234	15A	84	16	$sm_T \gg Sm_N$
10699	15B	30	70	$Sm_T \ll Sm_N$

Tableau 8: Résultats du calcul des proportions relatives des Sm_T et des Sm_N

au sein de la population smectitique extraite de la fraction argileuse (fraction < à 2µm, ES).

En poudre désorientée (matériau global), le poucentage relatif des smectites (estimé avec la prise en compte des minéraux non argileux présents) obtenu sur un seul échantillon (9368), est très faible (14,2%). (Annexe III.10:tableau 4).

II.4.6. Analyses chimiques (bulletins analytiques).

(Annexe IV: tableau 14).

Il n'y a pas d'analyse chimique réalisée sur les smectites. Seules des données analytiques (bulletins d'analyse, ISABU) sont présentées en annexe IV (tableaux 13 et 14). Dans le cadre de ce travail, ces résultats ne permettent pas d'en tirer des conclusions.

II.5. La région de Nyanza-Lac. (Fig. 43; Fig. 44; Fig. 45).

II.5.1. Situation géographique. (Fig. 43).

La plaine de Nyanza-Lac est située à la pointe Sud-Ouest du pays et présente une extension Est-Ouest d'une quinzaine de kilomètres.

Les sites à smectites dont il est question ici, se situent dans une zone déprimée de la région de Nyanza-Lac, constituée par les vallées des rivières Rwaba et Gifuruzi. (Fig. 43).

Le relief y est plat ou légèrement incliné. Les argiles noires forment dans ces vallées, des plages assez limitées en extension. Elles occupent les parties alluviales fluviatiles à caractère marécageux, occasionnellement inondées avec des eaux stagnantes, en contrebas des collines précambriennes.

II.5.2. Contextes géologique et pédologique. (Fig. 44).

Les contextes géologiques et pédologique de la région de Nyanza-Lac sont, en fait, de même type que ceux de la région de Rumonge (II.4.2). La plaine y est constituée de dépôts holocènes et de dépôts de glacis.

Les argiles noires font partie des alluvions fluviatiles actuelles, constituées de galets roulés, mélangés à une matrice plus fine de sables, de limons et d'argiles. Leur dépôt a lieu surtout lors des crues de la saison des pluies. Ce sont des alluvions finement stratifiées en provenance des contreforts précambriennes.

La carte géologique du Burundi (Radulescu, 1981; I.G.N, 1990) et aussi la Feuille "Nyanza-Lac" récente (1988) montrent que la plaine de Nyanza-Lac est limitée par plusieures failles et que le réseau hydrographique draine un large bassin versant, ne comportant que des matériaux d'âge archéen, enciennement connus sous le titre de "complexe gneissique de KIKUKA (fig. 4.).

On y observe de fréquentes occurrences de petits massifs de roches vertes et de roches ultrabasiques métamorphisées (Ndangamiza, 1990; Deblond, 1990).

II.5.3. Observations de terrain et description de profils. (Annexes I.5.1; I.5.2; Fig. 44; Fig. 45).

Les données de terrain de la région de Nyanza-Lac totalisent huit points: quatre points d'observation (11; 12; 13; 14) ont été décrits dans la vallée de la RWABA (Fig. 45; Annexe I.5.1). Trois puits ont

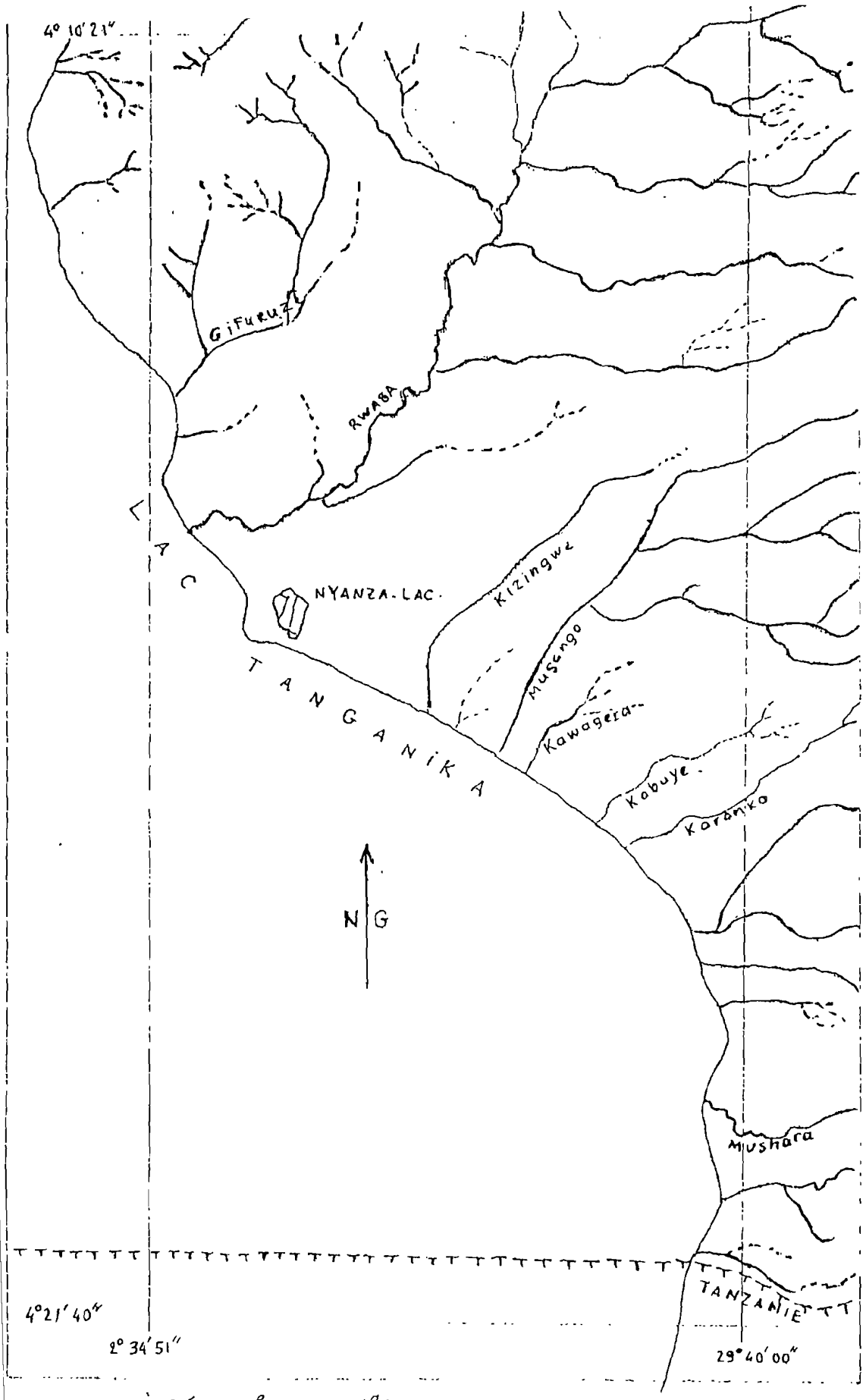


Fig.45. Réseau hydrographique.

Echelle : 1/100.000

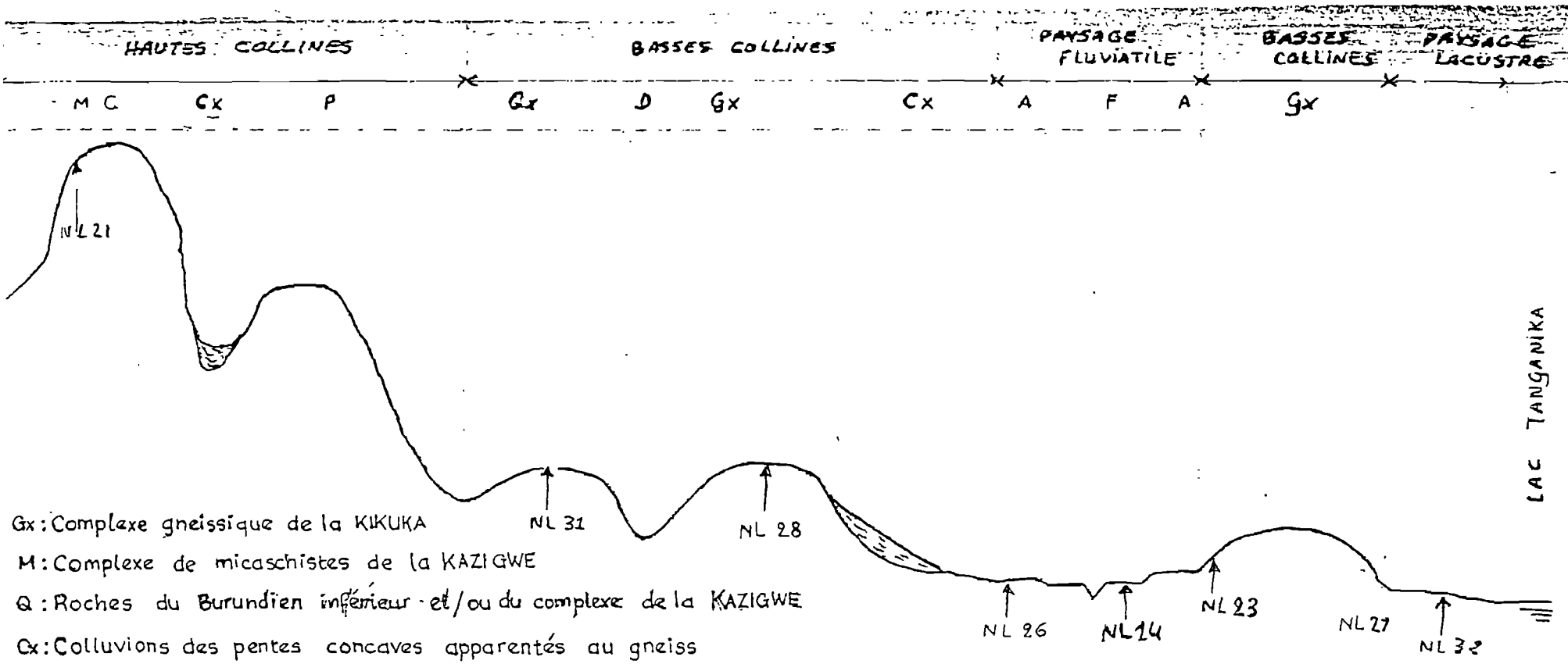


Fig 44 Répartition schématique des matériaux parentaux dans le paysage de la plaine de Nyanza-Lac. (Museruka, 1980).

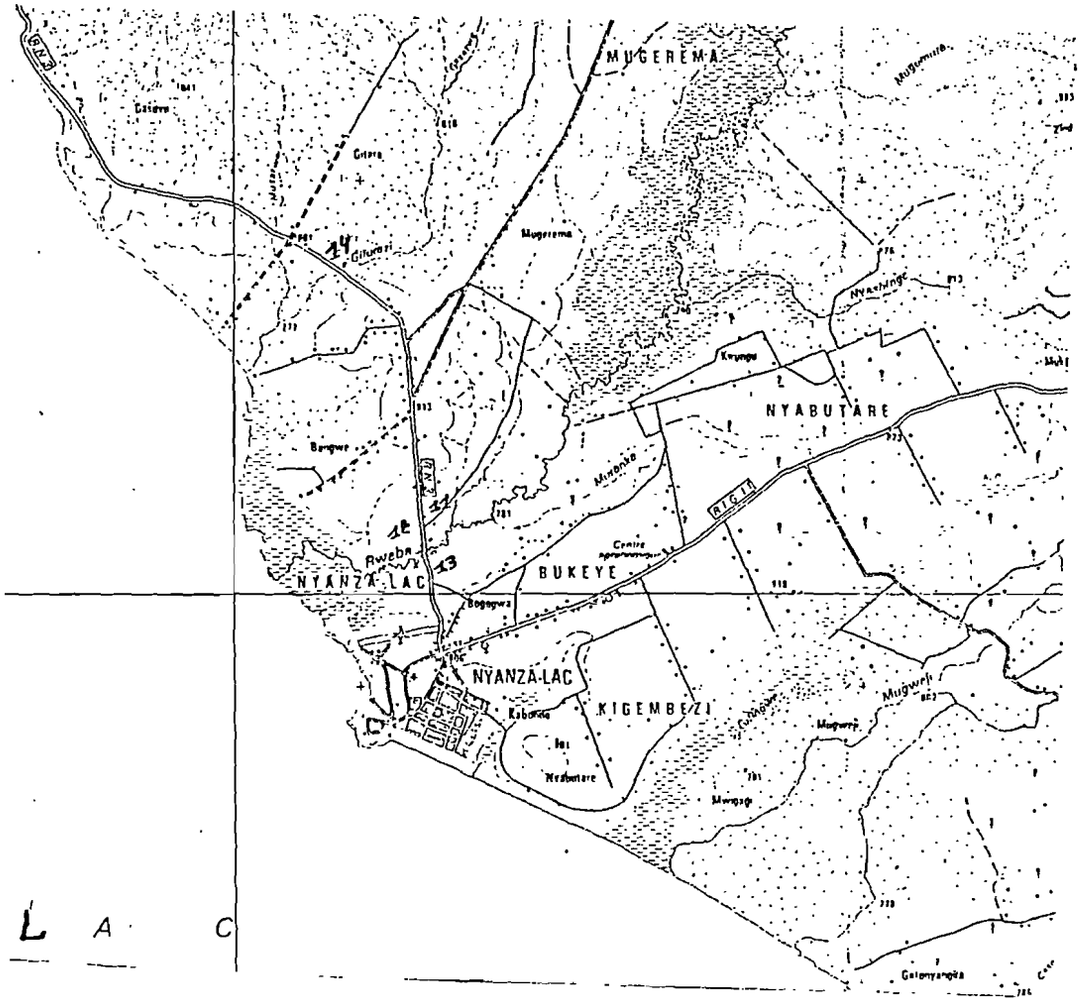


Figure 45: Carte des points d'observation. (Nyanza - lac).

été décrits par Ngendakumana (Annexe I.5.2). Deux de ces derniers sont localisés dans la même vallée de la RWABA (dans le périmètre du pont intersectant la RN.3). Un autre puits (G14) a été creusé dans la vallée de la GIFURUZI, à proximité immédiate du pont sur le ruisseau, au Nord de Nyanza-Lac. L'échantillonnage, réalisé tous les 20Cm, comporte respectivement huit (dans le puits 11), douze (dans le puits 13) et dix (dans le puits 14) échantillons.

Tous les puits ont été creusés au cours du mois de Juillet 1989. Le creusement a été arrêté lors de la rencontre de croûtes carbonatées difficiles à percer, ou de la traversée de niveaux argileux à lithologie contrastée.

Un profil pédologique, localisé sur la route Nyanza-Lac - Bujumbura, dans les alluvions de la RWABA, a été décrit et prélevé par Museruka (1980). (Fig.4; Annexe I.5.2).

Au km 121,5 de la RN.3, sept échantillons ont été prélevés par Chartry (Direction Générale de la Géologie au Ministère de l'Energie et Mines du Burundi). Quatre autres échantillons ont été pris par le même auteur dans la vallée de la GIFURUZI.

L'horizon de surface de ces argiles noires présente une texture fine et une structure polyédrique très bien développée. Les horizons sous-jacents ont une structure en forme de coin ou de parallèlepipède, qui est provoquée par l'entrecroisement des miroirs de glissement.

Les mauvaises conditions de drainage dans ces zones occasionnellement inondées avec des eaux stagnantes, se traduisent, sous l'horizon A, par la présence de taches de rouille ("gley") diffuses, d'intensité et de fréquence variables dans le profil pédologique.

On note la présence de conrétions carbonatées abondantes en profondeur.

II.5.4. Analyses granulométriques (bulletins analytiques).(Annexes II.1; II.2: tableau 11.).

La caractérisation, du point de vue de la granulométrie des argiles noires, a été effectuée dans le Laboratoire de Chimie Agricole de l'ISABU, dans le cadre d'un mémoire sur "La contribution à l'étude pédo-agronomique de la plaine de Nyanza-Lac". (Museruka, 1980). Les résultats figurent en annexe II (tableau 12).

Par ailleurs, sept échantillons (10710; 10718; 10719; 10724; 10728; 10730) ont été également analysés (Müller, Université du Burundi). Les résultats sont représentés en annexe sous forme de courbes de distribution granulométrique. (Annexe II.1).

Dans la zone vertisolique, les analyses montrent que le taux d'éléments fins (argiles et limons) est élevé et est voisin de 70%.

II.5.5. Analyse minéralogique. (Annexes III.4:tableau 5; III.9:tableau 2; III.10; Fig. 46).

Trente-cinq échantillons ont été analysés en agrégats orientés (A.O) (fraction < à 2µm E.S). Vingt-trois échantillons de la vallée de la RWABA (10 éch. dans le puits RW.11; 1 éch. dans le puits RW.12; 12 éch. dans le puits RW.13) ainsi que douze échantillons de la vallée de la GIFURUZI (dans le puits G14). Les résultats sont donnés en annexes III.4 (tableau 5), III.9 (tableau 2).

Quatre échantillons seulement du matériau global (poudre désorientée) ont été analysés. (Annexe III.10: tableau 4).

La figure 46 montre que les échantillons analysés en A.O (fraction < à 2µm E.S) sont définis par un nuage de points relativement large, occupant néammoins une surface bien circonscrite dans la représentation triangulaire.

Dans le détail, les échantillons provenant du puits GIFURUZI, se détachent du nuage de points pour former une "entitée linéaire" bien individualisée, parallèle à l'axe smectite-kaolinite.

Les puits RW.11 et RW.13 par contre, présentent un nuage de points, oblique par rapport à l'axe smectite-kaolinite, avec un contenu plus important en illite.

On notera que les deux derniers puits sont issus d'une même dépression endoréique. Ils ne sont pas séparables l'un de l'autre dans le diagramme triangulaire.

Les résultats semi-quantitatifs (en A.O) montrent une proportion relative de smectites, variable entre 10 et 30% dans la vallée de la RWABA et 40 et 70% dans la vallée de la GIFURUZI.

Les smectites de la vallée de la GIFURUZI sont bien cristallisées sur l'ensemble du profil (annexe III10: fig. C). Elles appartiennent aux classes de cristallinité A ou B de Thorez (1976). De haut en bas des couches vertiques, on observe une amélioration très nette de la cristallinité des smectites, avec des réflexions mieux élaborées et plus fines à la base de l'horizon vertisolique.

De même, pour les smectites du puits RW.11, elles apparaissent aussi bien cristallisées en haut qu'à la base du profil.

La saturation au LiCl montre que:

- la montmorillonite prédomine sur les interstratifiés (10 -14M) et les (10 -14Bei) sont présents presque systématiquement dans les trois puits (RW.11; RW.13 et G14);
- le puits GIFURUZI (G14) apparaît plus riche en (10 -14Bei) que les autres puits;
- les puits RW.11 et RW.13 se marque par la présence plus importante de (10 -14Bei) à la base des deux coupes. Le puits GIFURUZI présente une tendance inverse: le pourcentage de montmorillonite augmente de haut en bas de la coupe, avec une diminution corrélative de (10 -14Bei) et une disparition des (10 -14M).

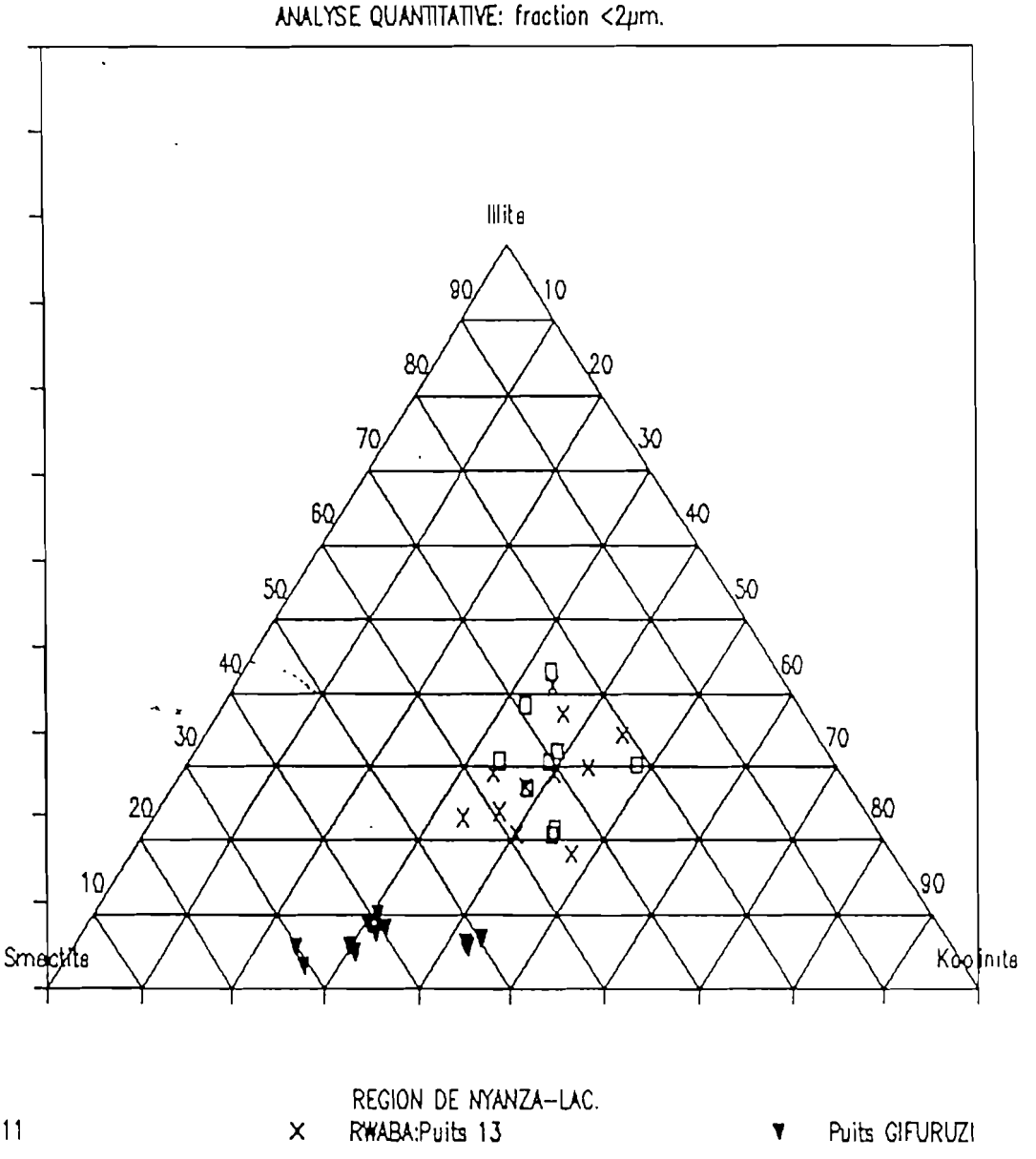


Figure 46 : Diagramme triangulaire de représentation des résultats semi-quantitatifs pour la région de Nyanza-Lac: répartition en trois puits: Rwaba 11 et 13 & Gifuruzi (fraction <2µm, ES).

CHAPITRE III: INTERPRETATION GEOLOGIQUE DES MATERIAUX ETUDIES: GENESE et CONCLUSIONS.

Deux mécanismes "antagonistes" interfèrent dans la génèse des smectites de la plaine de l'Imbo, sous climat à saisons contrastées:

- **la néoformation in situ**: elle crée "de toutes pièces" (Goemaere, 1991) les smectites à partir des solutions riches en cations basiques (Mg, Ca, Na, Fe).
- **l'héritage argileux**: il apporte, en provenance des zones hautes dans la topographie, la kaolinite, l'illite et le talc.

L'héritage de la dorsale concerne également les minéraux non phyllosilicatés observés (quartz, feldspaths, pyroxène,...). La plupart de ces minéraux (argileux ou non) prennent des ittineraires de transformation (par dégradation ou néoformation) en smectites, dans ce milieu tropical.

Le schéma de l'interprétation des différents mécanismes responsables de l'association smectitique des vertisols de la dépression du graben du Lac Tanganyika, est représenté dans le bloc-diagramme de la figure 47.

Sur le plan géochimique, le mécanisme à la base de la néosynthèse des smectites dans la plaine, est le suivant:

1° - dans les contreforts précambriens, le drainage y est tellement intense que la Silice est éliminée, soit totalement (donnant lieu à la gibbsite:$Al(OH)_3$, soit partiellement, formant la kaolinite dans des conditions climatologiques chaudes et humides (Nkurikiye, 1989).

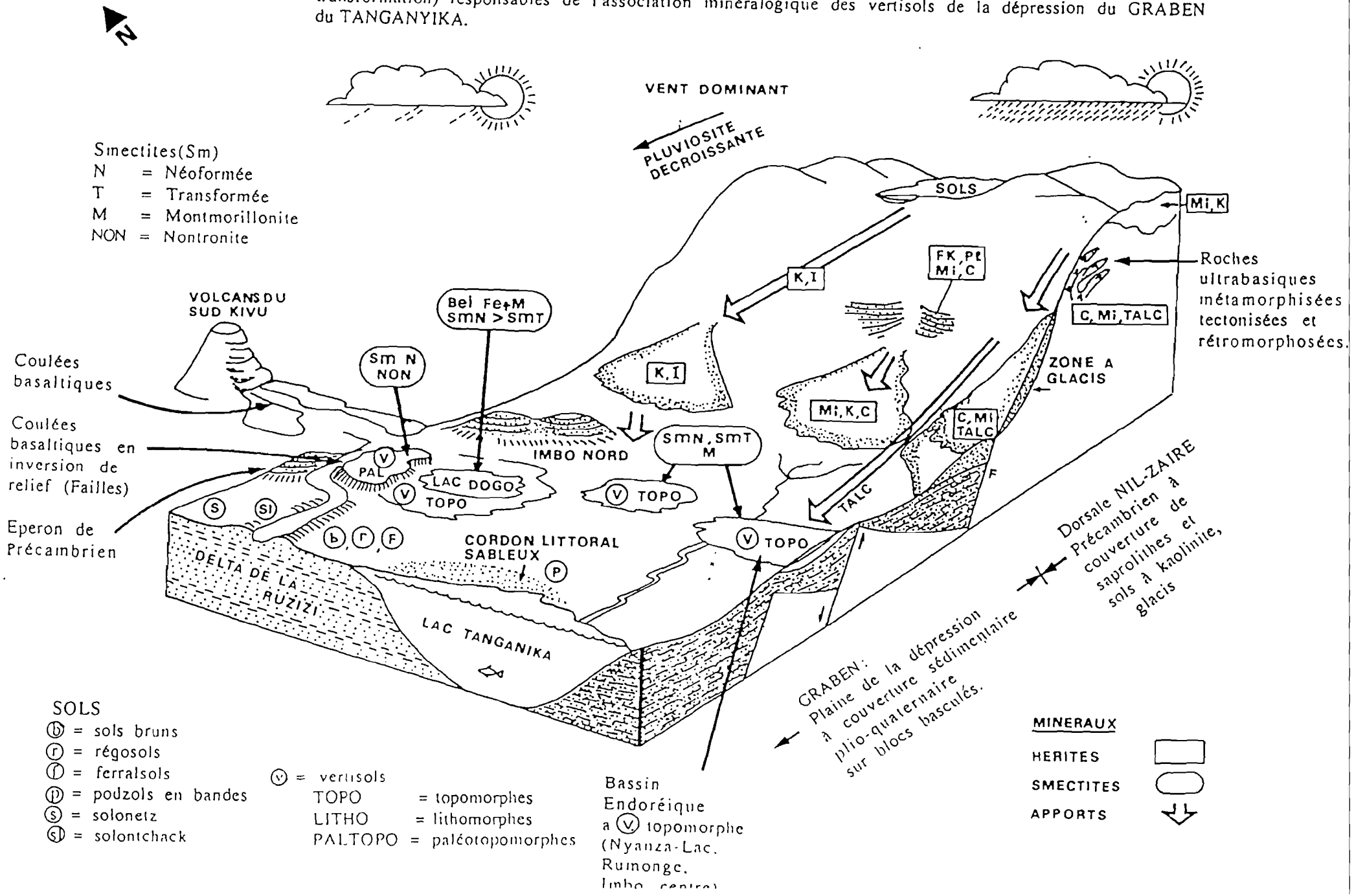
2° - dans les zones dépressionnaires (bassins de réception des alluvions apportées des contreforts précambriens par les eaux courantes), le drainage étant quasiment nul (milieux confinés), le rapport Si/Al (= 2) donne lieu, en présence des cations mobiles (basiques), à la génèse des smectites sous climat à alternance de saisons contrastées: pendant la saison aride (sèche), l'évaporation augmente la concentration des solutions. Cela favorise la néosynthèse des smectites.

Les analyses chimiques ne sont pas d'un grand intérêt pour une interprétation génétique des smectites. En raison de l'assemblage polyminéral et de la présence de la matière organique dans le matériau étudié, on ne saurait pas "ventiler" les cations des smectites de ceux des autres composants, pour caractériser les smectites par leurs compositions chimiques.

La confrontation des diverses observations (du point de vue sédimentologique et pédologique) permet de discuter de la nature réelle de ces vertisols et de leurs mécanismes génétiques sur le plan pédo-géologique (origine"lithomorphe" et/ou "topomorphe"?).

Des considérations sédimentologiques, on conclut que toutes les argiles smectitiques des zones

Fig. n° 4 : Bloc diagramme schématique présentant les différents mécanismes (héritage, néoformation, transformation) responsables de l'association minéralogique des vertisols de la dépression du GRABEN du TANGANYIKA.



investiguées sont **topomorphes,** c'est-à-dire **formées dans des zones dépressionnaires.**
Une origine "**paléotopomorphe**" est toutefois retenue pour les argiles noires disposées en relief, sur les coulées basaltiques dans la région de Cibitoke. Ce sont des **"anciens" vertisols topomorphes** (formés dans des dépressions qui existaient avant le jeu de la tectonique de faille liée au Rift) et non pas des vertisols "lithomorphes".

Le qualificatif de "paléotopomorphes" des vertisols associés aux basaltes, est confirmé par l'existence d'une **filiation latérale** entre ceux-ci et les vertisols topomorphes de la dépression du lac Dogo-Dogo: ils proviennent de la même zone géographique et ne diffèrent que par la position relative dans la topographie actuelle. C'est en raison de cette position topographique particulière (en relief) des vertisols associés aux basaltes que le terme de "paléotopomorphe" paraît le mieux approprié.

L'activité tectonique liée au Rift et connue depuis le Néogène (26 m.a) jusqu'à nos jours (Tack et al., 1987), est à l'origine de la disposition surélevée actuelle (en blocs basculés vers l'Ouest) par inversion de relief des vertisols coiffant les couches basaltiques. Cette structure tectonique est également responsable de la formation de petites dépressions, depuis l'Imbo-Nord (la dépression du lac Dogo-Dogo) jusque dans la région de Nyanza-Lac, où se développent des vertisols et sols vertiques topomorphes. Ces derniers sont interprétés comme des argiles de colmatage dans des "micro-bassins" tectoniques, sur l'emplacement d'anciens axes de drainage.

La thèse de l'origine "paléotopomorphe" des argiles noires sur basaltes de Cibitoke, est étayée par des arguments aussi bien géologiques que minéralogiques.

1° **Arguments géologiques:**

- le passage continu des vertisols coiffant le basalte aux vertisols de la dépression du lac Dogo-Dogo;
- la présence de "chapelets" de galets de roches précambriennes au sein ou à la base des argiles smectitiques;
- l'association spatiale (en coupe et en plan) vertisols-gravières;
- l'absence d'une variation transitionnelle (critère d'un sol résiduel) entre le bed-rock basaltique et l'argile noire;
- le système tectonique en blocs basculés, postérieur à la mise en place des basaltes et des galets (car il les affecte), les coulées basaltiques s'écoulant préférenciellement dans les zones basses et les vallées. L'inversion de relief a permis de rehausser différenciellement le contact (affleurant parfois en surface) entre les vertisols et le substrat basaltique.

Le seul argument accréditant la nature "lithomorphe" des vertisols associés aux basaltes, réside dans le "contact" entre ce substrat et ces argiles smectitiques. C'est précisément la nature de ce contact qui remet en question l'origine lithomorphe de ces dernières (les smectites), en raison de la présence de galets de roches précambriennes dispersés dans la masse d'argiles noires, ou concentrés en petites lentilles, soit au contact direct avec le basalte, soit dans l'argile noire.

Le "cuirassement calcaire" de la région confirme l'hypothèse de la "**paléodépression**" (ancien milieu des eaux courantes (II.1.2)). L'induration ne pouvant se réaliser que si le climat est sec (aride) pendant certaines et longues périodes de l'année, ces "calcrètes" (ou "caliches") cuirassées (d'une grande extension dans la région) sont ainsi une signature d'un paléoclimat aride ou à saisons contrastées (courte saison des pluies et longue saison sèche). Il a été signalé plus haut que ces phases climatiques plus sèches sont favorables à la génèse des smectites.

2° **Arguments minéralogiques:**

La palygorskite (= attapulgite) dans les vertisols de la dépression du lac Dogo-Dogo confirme le caractère confiné du milieu et l'aridité du climat (deux facteurs favorables à la génèse des smectites).

Les argiles vertes, formées dans des conditions réductrices de vallées (zones basses), ont été surélevées à l'altitude des conditions oxydantes (altération ferralitique) lors du processus d'inversion de relief.

La nature même de l'assemblage minéralogique de ces argiles d'altération, confirme l'origine plutôt topomorphe. Etudiant l'altération des basaltes, Delvigne, 1960 (in Delaunois, 1979 et Compagnion, 1979 et repris par Goemaere, 1991), a montré que le premier stade est marqué par l'apparition et le développement de craquelures verdâtres affectant les gros cristaux d'olivine. Le produit de remplissage de ces veinules présente les caractéristiques d'une smectite dioctaédrique de type nontronite. Les "boulders" s'exfolient ensuite en pellicules concentriques dont l'évolution et la disparition seront guidées par le drainage interne, donc par la pluviométrie.

En conditions de drainage réduit, la nontronite subsiste jusque dans les horizons superficiels, tandis que la kaolinite, l'halloysite, la gibbsite et les oxydes (hydroxydes) de Fer apparaissent si le drainage est important.

Le contenu très faible à nul en ces derniers minéraux, couplé à la subsistance de la nontronite jusque dans les horizons superficiels, confirme ainsi l'hypothèse de la "paléodépression" (conditions de drainage entravé) dans un environnement basaltique.

La minéralogie des argiles noires topomorphes (de la dépression du Dogo-Dogo) confirme également le qualificatif de "paléotopomorphes" des vertisols associés aux basaltes (du fait de la

filiation latérale qui existe entre le premier type et ces derniers): situées plus haut dans la topographie, les argiles noires qui coiffent le soubassement basaltique ont contribué à l'alimentation des zones déprimées. Ainsi, sont-elles donc chronologiquement antérieures à la phase tectonique responsable de la formation des dépressions où sont venues se déposer les argiles noires.

L'origine du matériau parental des vertisols et sols vertiques auxquels sont associées les smectites, est triple:

- héritage par ruissellement et alluvionnement, avec des solutions riches en bases.

Au sein des argiles noires paléotopomorphes, l'apport de minéraux argileux de l'altération des basaltes, résulterait de l'érosion en amont de véritables vertisols lithomorphes (qui n'existent plus). Si ces derniers ont existé dans la région, ils ont été déblayés par l'érosion pour laisser la place aux placages alluvionnaires (constitués d'éléments d'apports issus de l'érosion fluviatile) d'extension et d'épaisseur très variables: de l'échelle centimétrique (là où le basalte affleure) à l'échelle métrique. La nontronite (béidellite), formée par altération superficielle du basalte, s'expliquerait par héritage minéralogique latéral.

- néoformation in situ des smectites (et éventuellement de la kaolinite si les conditions le permettent). Les solutions, riches en bases, proviennent des zones hautes dans la topographie (dans les contreforts précambriens) et, pour les vertisols des dépressions actuelles de la zone de Cibitoke, les solutions proviennent également partiellement des vertisols paléotopomorphes et/ou des produits d'altération directe des couches basaltiques.

Pour les mêmes vertisols topomorphes situés en environnement basaltique, on peut imaginer que, de part leur contenu très faible en minéraux argileux d'origine détritique (kaolinite et illite), les coulées basaltiques y ont joué un rôle de "barrage", en isolant de petits bassins propices à la néoformation de smectites, sans autres apports (sinon très faibles) que les solutions issues de l'altération basaltique. Ceci est en accord avec les conclusions de Goemaere (1991).

- héritage, par les rivières, des illites et des kaolinites (éventuellement du talc) issus du remaniement des saprolithes formées sur la dorsale Zaïre-Nil. La présence systématique de paillettes de muscovites (très résistantes à l'altération) confirme l'origine allochtone de ces produits: ces micas sont issus, par héritage direct, des roches cristallines qui forment les versants du graben. Les galets (souvent de roches métamorphiques), disséminés dans les argiles noires, en abondance dans certains endroits (les gravières de l'Imbo-Nord) et plus rares en d'autres, proviennent du remaniement des formations Burundiennes du bassin versant oriental de la plaine (héritage détritique ou mécanique). L'occurrence de ces galets indique que les courants d'apports ont pu acquérir temporairement un régime torrentiel: débordant de leurs cours naturels, ils ont déposé des argiles dans la plaine d'inondation. La variabilité et hétérogénéité dans la granulométrie reflètent les conditions et le type

de dépôts épisodiques: les phases successives des apports, sont bien marquées par une stratification apparente dans les horizons pédologiques. Les strates visibles sont dues aux variations dans les conditions de dépôt. Les niveaux sableux intercalés dans les vertisols, montrent qu'une néosynthèse des minéraux smectitiques a eu lieu pendant la phase des apports alluvionnaires. Les variations d'illites et de kaolinites en fonction de la profondeur confirment l'hypothèse des apports épisodiques.

Dans les sites de smectitisation (cuvettes de débordement), la granulométrie fine des argiles noires (dominance de particules de diamètre inférieur à 1µm) permet de conclure à l'absence d'écoulements brutaux dans les anciennes zones déprimées.

La présence de minéraux lourds (ilménite) et du talc qui appartiennent essentiellement à des roches éruptives (acides ou basiques) et/ou métamorphiques, confirment que les formations lithologiques Burundiennes qui cernent la plaine, ont assuré un rôle prépondérant dans l'alimentation du bassin de sédimentation. Les éléments clastiques (quartz, feldspaths, débris de roches...) constituent des anomalies mécaniques (qui ont résisté à la "digestion") dans les argiles smectitiques. Ils témoignent une dispersion mécanique de l'ensemble des matériaux pédogénétiques jusque dans les bassins de réception.

Ainsi donc, la génèse des smectites dans les milieux étudiés, a été favorisée par le fait que ces derniers étaient des dépressions plus ou moins fermées, tout en recevant des eaux de rivières qui y débouchaient. En saisons sèches, suite à l'évaporation, ces zones constituaient des milieux pédogénétiquement confinés. Toutes les conditions favorables à la formation des smectites se trouvent réunies dans la zone en dépression liée au graben du Lac Tanganyika:

- l'alternance de saisons contrastées;
- des températures annuelles élevées;
- de petits bassins à drainage entravé. Le mauvais drainage est lié à la topographie et à la nature des sédiments de texture fine à très fine.
- la richesse en cations basiques: Mg, Ca, Fe, Na.

Dans les milieux avec de telles conditions, la génèse de smectites par néosynthèse ou dégradation à partir d'autres minéraux, est ainsi un processus en évolution permanente et actuelle dans le graben.

La proportion des minéraux smectitiques, bien que parfois faible par rapport à celle de la kaolinite et/ou des illites dans le matériau global étudié, est responsable des propriétés physico-chimiques et hydriques du milieu pédogénétique. L'étymologie du terme (verto = je tourne) est ainsi référée à ces minéraux gonflants qui induisent des mouvements dans les sols auxquels ils sont associés.

CHAPITRE IV: ASPECTS GEOTECHNIQUE, AGRICOLE et INDUSTRIEL DES MATERIAUX ETUDIES: PROPOSITION DE SOLUTIONS.

Les vertisols sont habituellement connus comme des "**sols à problèmes**". Ce sont des "**ennemis**" des constructions, des machines agricoles, des automobiles et même des piétons pendant la saison des pluies. Cela est dû à leurs propriétés caractéristiques de gonflement et de grande plasticité.

A cause de leur forte capacité d'absorption d'eau, les argiles gonflantes smectitiques provoquent des glissements de terrain particuliers sous forme de coulées boueuses (Rugema, 1990).

Du point de vue agricole, ce sont des sols potentiellement fertiles mais difficilement exploitables.

Sur le plan industriel, la prospection des smectites n'a pas donné des résultats satisfaisants pour encourager l'industrialisation du Burundi à partir de production de céramique à base de kaolin.

IV.1. Aspect géotechnique des matériaux smectitiques.

Les fondations pour ouvrages de génie civil et/ou habitations privées construites sur ces matériaux gonflants smectitiques du Burundi, ont fait l'objet d'une attention toute particulière au Burundi, suite à de nombreux et importants dégâts (très coûteux) occasionnés à des bâtiments dans certains quartiers de Bujumbura.

Il est généralement accepté que ce sont les minéraux smectitiques qui sont à l'origine des mouvements dans les sols vertiques. Or, le site de la Capitale (Bujumbura) et les zones d'extension future de la ville (Imbo-Centre), sont porteurs de vertisols et de sols vertiques.

L'identification des caractères physiques et mécaniques de ces argiles gonflantes sur lesquelles on construit, est une nécessité maintenant reconnue.

Le présent paragraphe se place dans la perspective d'éclairer les mécaniciens du sol, et par extension les architectes et les constructeurs dans leurs efforts de "minimiser" les contraintes exercées par ces sols gonflants, de manière à être supportables par la construction.

Les paramètres géotechniques (limites d'Atterberg, distribution granulométrique, pressions de gonflement ...) ont été déterminés à l'Université du Burundi (Prof.K.Müller) sur:

- sept échantillons de la zone BUJUMBURA: trois du quartier ROHERO; trois du quartier KAMENGE et un seul échantillon du quartier KININDO.
- Quatorze échantillons issus des différents points de prélèvement.

Les résultats sont présentés en annexe V.

Les argiles smectitiques issues du site de BUJUMBURA montrent une dispersion plus grande. Elles se disposent à cheval sur trois secteurs, ce qui peut être attribué au mode de sédimentation et à la distribution spécifique (héritage/néoformation, variabilité de la sédimentation) des minéraux argileux sur le glacis (Goemaere, 1991).

Dans la plaine de Nyanza-Lac, on observe un contraste entre les puits des vallées RWABA (limons et limons organiques) et GIFURUZI (argile de forte plasticité).

3° La pression de gonflement. (Annexe V: tableau 2).

La détermination de la pression de gonflement a été réalisée sur huit échantillons seulement dans l'appareil oedométrique, à partir d'échantillons non remaniés (= essai oedométrique).

Le taux de gonflement a été calculé à la fin de l'essai et exprimé en %. (Annexe V). La relation entre la charge appliquée et les pourcentages de gonflement, fournit les courbes de gonflement. (Fig. 53). Le point d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses donne la pression de gonflement (Müller et Diel, 1991).

Les échantillons ont été préalablement séchés à l'air jusqu'à des poids constants, afin de débuter les essais dans des conditions similaires. Les résultats sont repris en annexe V (tableau 2).

Ces sols présentent des pressions de gonflement qui s'échelonnent entre 25 et $300 KN/m^2$; un échantillon (n°8) atteint $800 KN/m^2$. L'étude du gonflement en fonction du temps (fig. 54) montre que le gonflement maximal est rapide et est atteint après un ou deux jours seulement.

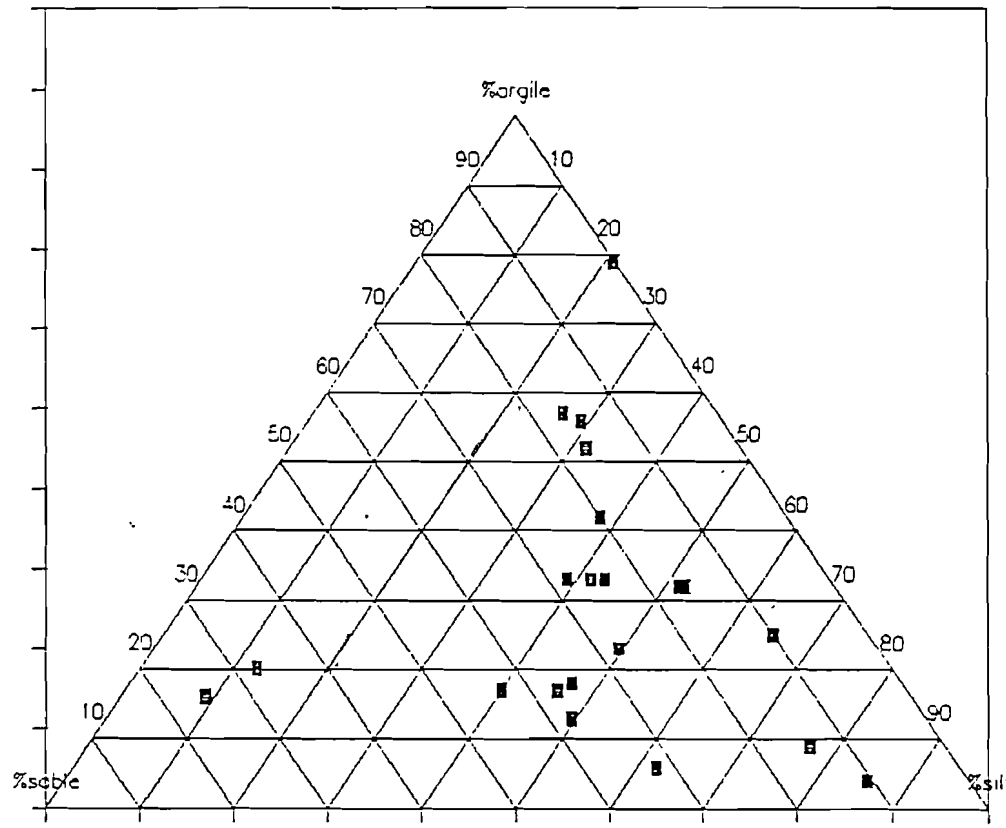
De telles valeurs (pressions de gonflement maximales) doivent être confrontées aux pressions exercées par la construction et à la contrainte admissible par le sol (obtenue par calcul des tassements et de la sécurité à la rupture du sol).

Les variations entre de larges limites des pressions de gonflement et la rapidité avec laquelle la pression maximum de gonflement est atteinte, doivent être prises en compte dans le calcul des fondations.

La figure 55 établit graphiquement une relation entre la valeur de la pression de gonflement (KN/m^2) et les pourcentages des minéraux argileux gonflants (fraction < à 2µm) obtenus par diffractométrie. Müller et Diel (1991) postulent une relation linéaire entre ces deux paramètres. Ils déterminent une droite de régression (coefficient de corrélation de 0,69 pour un nombre d'échantillons n égal à 8).

Il est évident que des facteurs limitatifs pour l'établissement de cette relation existent. En effet, la dispersion des résultats d'essais au laboratoire est souvent liée aux problèmes d'échantillonnage (les argiles gonflantes sont difficiles à échantillonner d'une façon intacte pour les amener au la-

F 59 40 . DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE.



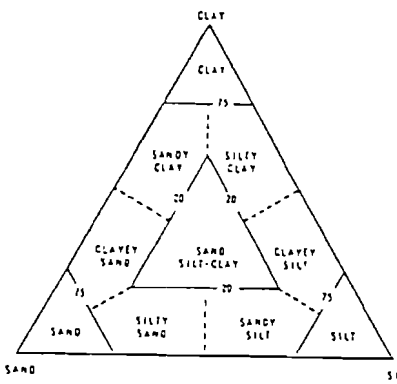


Fig. 1. Classification of intermediate and fine-grained sediments. (After SHEPARD, 1954, by permission of the Editor, Journal of Sedimentary Petrology.)

1° Distribution granulométrique. (Annexe II.1; Annexe V: tableau 1).

Les courbes granulométriques des sols smectitiques examinés (annexe II.1) ainsi que leur représentation triangulaire (argile-silt-sable) (fig. 48) montrent une très grande variabilité dans la granulométrie des argiles vertisoliques.

Les matériaux prélevés dans les puits KAGOTI (Rumonge: éch. 10701, 10709), NINGA (éch. 10742) et NYESHANGA (éch. 10750) (Imbo-Centre), sont riches en fraction argileuse. Par contre, les profils de la vallée de RWABA (Nyanza-Lac) montrent une richesse en fraction sableuse et/ou limoneuse (éch. 10718).

Conformément à la description macroscopique, le puits Pharmacie H (KAMENGE) présente des fluctuations, selon les échantillons (*éch'*.10735*vs*10750), inhérentes aux conditions de dépôt (Goemaere, 1991).

Les vertisols de la vallée de la GIFURUZI (Nyanza-Lac) sont plus riches en fraction argileuse (32 à 52%) que ceux de la vallée de RWABA (13 à 20%). Cette différence entre les deux puits a été notée antérieurement sur le plan minéralogique (la fraction argileuse de GIFURUZI renferme un contenu en minéraux gonflants, double de celui issu de RWABA), rendant compte des facteurs de station très différents (Goemaere, 1991).

2° Les limites d'Atterberg. (Annexe V: tableau 1).

Les limites d'Atterberg ont pour objet la détermination des états de consistance d'un sol.

La consistance d'un sol varie de façon continue avec la teneur en eau (exprimée par le rapport en % du poids de l'eau contenue dans un échantillon au poids sec de celui-ci après étuvage à 105°C): lorsque celle-ci augmente, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide. L'essai empirique définit conventionnellement les limites entre ces états et s'exprime en teneurs en eau.

Dans le cadre de cette étude, les limites d'Atterberg ont été mesurées sur différents vertisols couvrant les différentes régions étudiées (exception de l'Imbo-Nord).

Les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) fluctuent respectivement entre 25 et 75% et entre 5 et 45%. L'étendue du domaine plastique, caractérisée par l'indice de plasticité (I_p), varie entre 10 et 50%.

Du diagramme de plasticité établi (fig. 49): le regroupement des échantillons issus d'une même région (Imbo-Centre, Bujumbura, Nyanza-Lac: Rwaba et Gifuruzi) définit des secteurs plus limités. Par contre, pour l'ensemble des échantillons, le diagramme présente une distribution plus large.

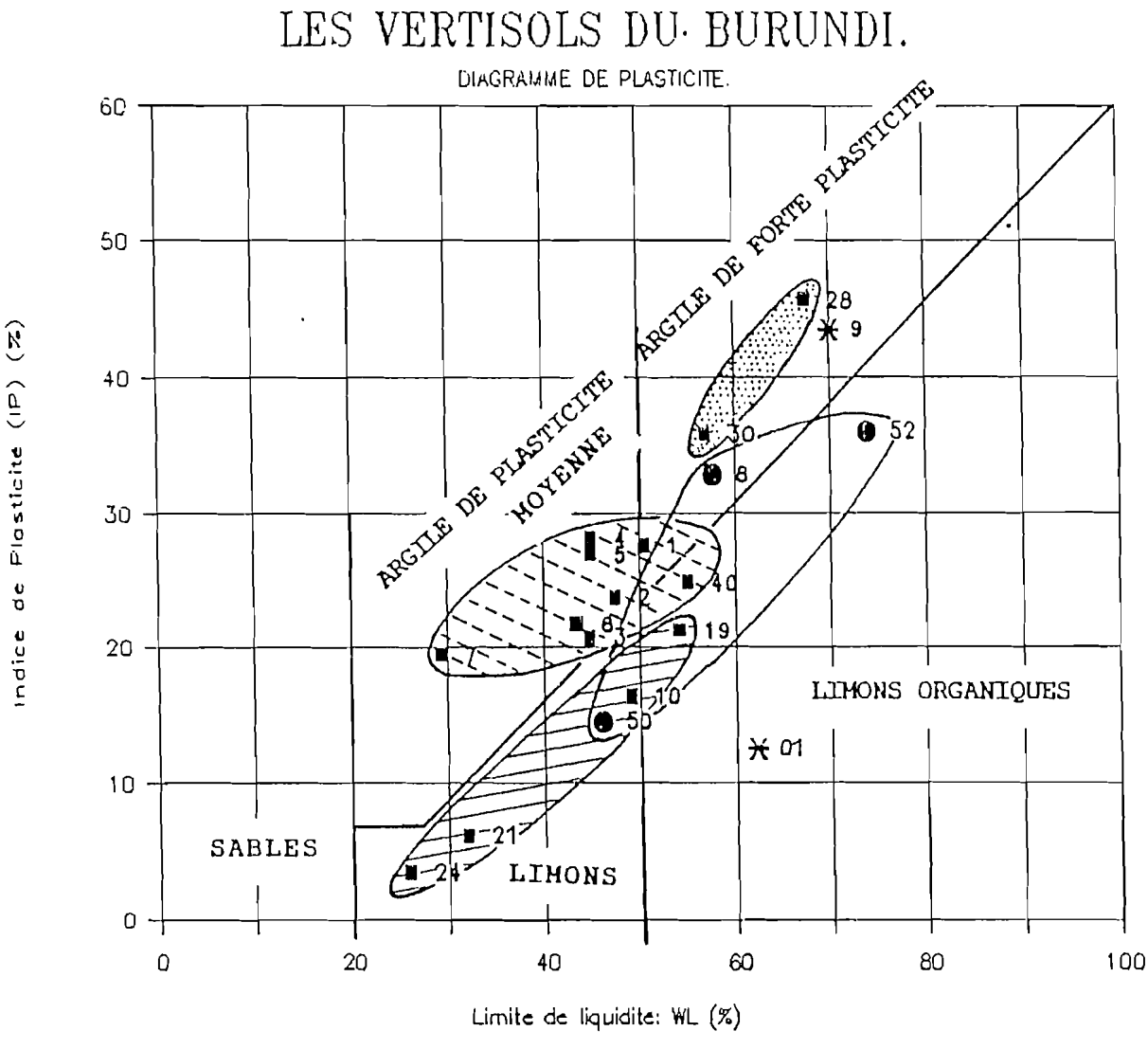


Figure N°9: Diagramme de plasticité établi pour quelques vertisols issus de différentes régions.

Les argiles smectitiques issues du site de BUJUMBURA montrent une dispersion plus grande. Elles se disposent à cheval sur trois secteurs, ce qui peut être attribué au mode de sédimentation et à la distribution spécifique (héritage/néoformation, variabilité de la sédimentation) des minéraux argileux sur le glacis (Goemaere, 1991).

Dans la plaine de Nyanza-Lac, on observe un contraste entre les puits des vallées RWABA (limons et limons organiques) et GIFURUZI (argile de forte plasticité).

3° La pression de gonflement. (Annexe V: tableau 2).

La détermination de la pression de gonflement a été réalisée sur huit échantillons seulement dans l'appareil oedométrique, à partir d'échantillons non remaniés (= essai oedométrique).

Le taux de gonflement a été calculé à la fin de l'essai et exprimé en %. (Annexe V). La relation entre la charge appliquée et les pourcentages de gonflement, fournit les courbes de gonflement. (Fig. 50). Le point d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses donne la pression de gonflement (Müller et Diel, 1991).

Les échantillons ont été préalablement séchés à l'air jusqu'à des poids constants, afin de débuter les essais dans des conditions similaires. Les résultats sont repris en annexe V (tableau 2).

Ces sols présentent des pressions de gonflement qui s'échelonnent entre 25 et $300 KN/m^2$; un échantillon (n°8) atteint $800 KN/m^2$. L'étude du gonflement en fonction du temps (fig. 51) montre que le gonflement maximal est rapide et est atteint après un ou deux jours seulement.

De telles valeurs (pressions de gonflement maximales) doivent être confrontées aux pressions exercées par la construction et à la contrainte admissible par le sol (obtenue par calcul des tassements et de la sécurité à la rupture du sol).

Les variations entre de larges limites des pressions de gonflement et la rapidité avec laquelle la pression maximum de gonflement est atteinte, doivent être prises en compte dans le calcul des fondations.

La figure 52 établit graphiquement une relation entre la valeur de la pression de gonflement (KN/m^2) et les pourcentages des minéraux argileux gonflants (fraction < à 2µm) obtenus par diffractométrie. Müller et Diel (1991) postulent une relation linéaire entre ces deux paramètres. Ils déterminent une droite de régression (coefficient de corrélation de 0,69 pour un nombre d'échantillons n égal à 8).

Il est évident que des facteurs limitatifs pour l'établissement de cette relation existent. En effet, la dispersion des résultats d'essais au laboratoire est souvent liée aux problèmes d'échantillonnage (les argiles gonflantes sont difficiles à échantillonner d'une façon intacte pour les amener au la-

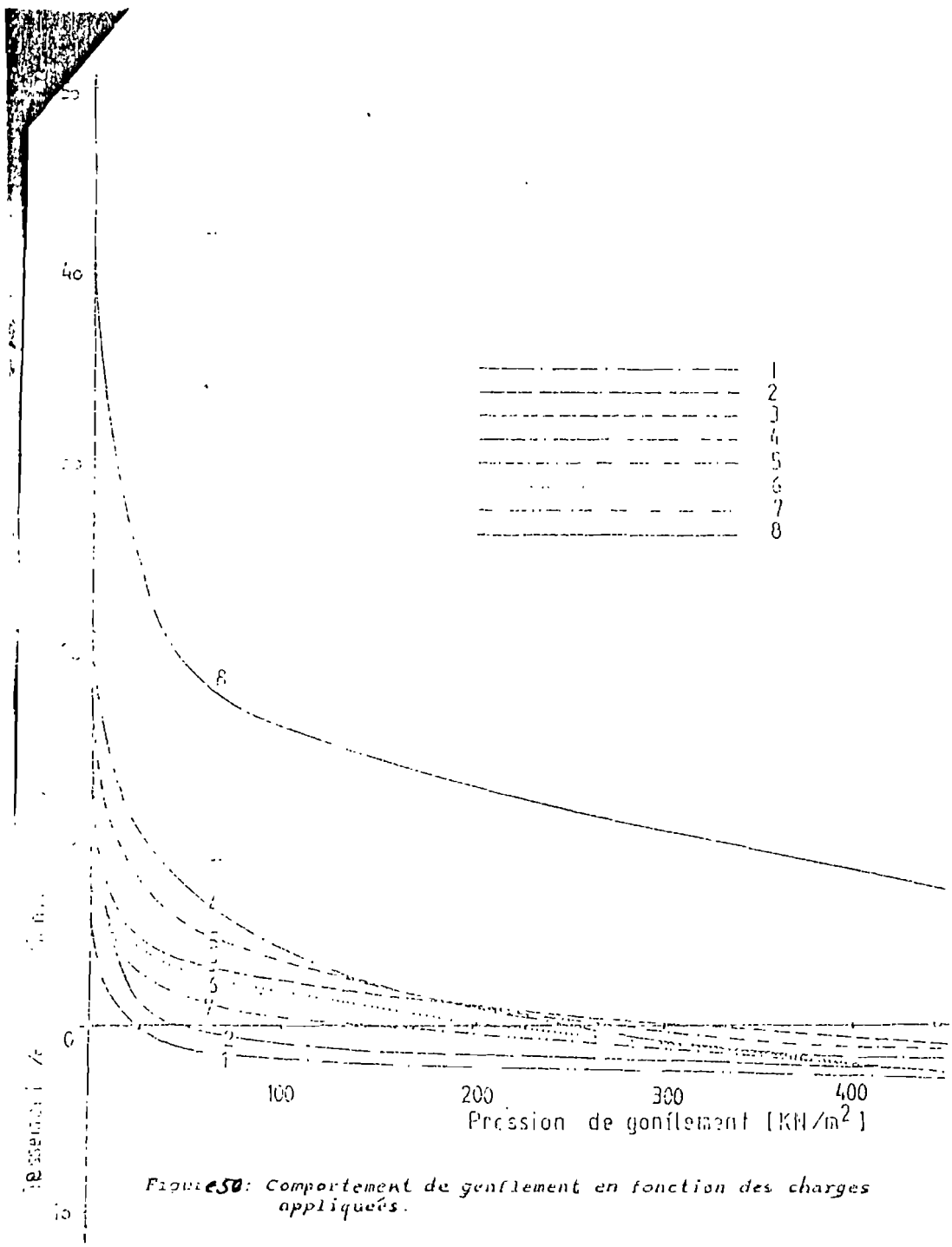


Figure 50 : Comportement de gonflement en fonction des charges appliquées.

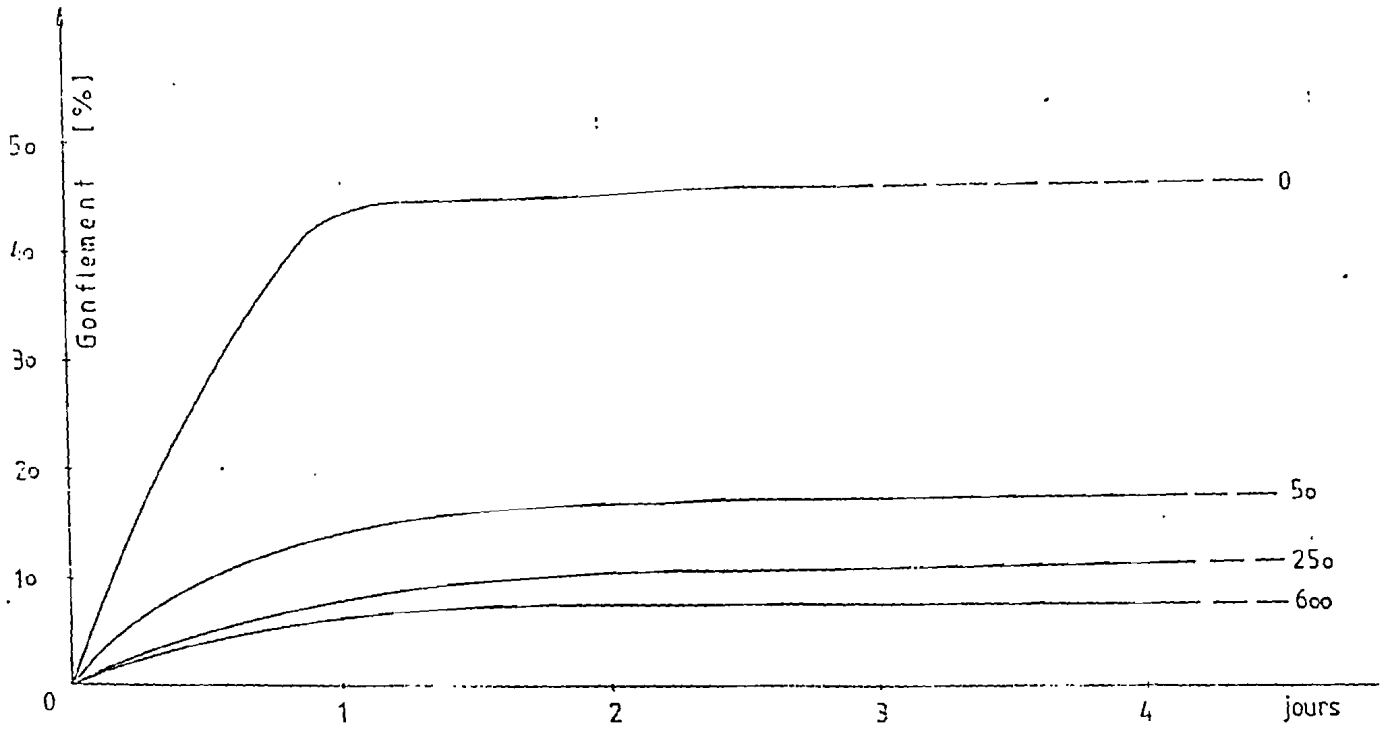


Figure 52: Relation entre gonflement et temps pour des charges différentes.
Charges 0 - 600 KN/m².

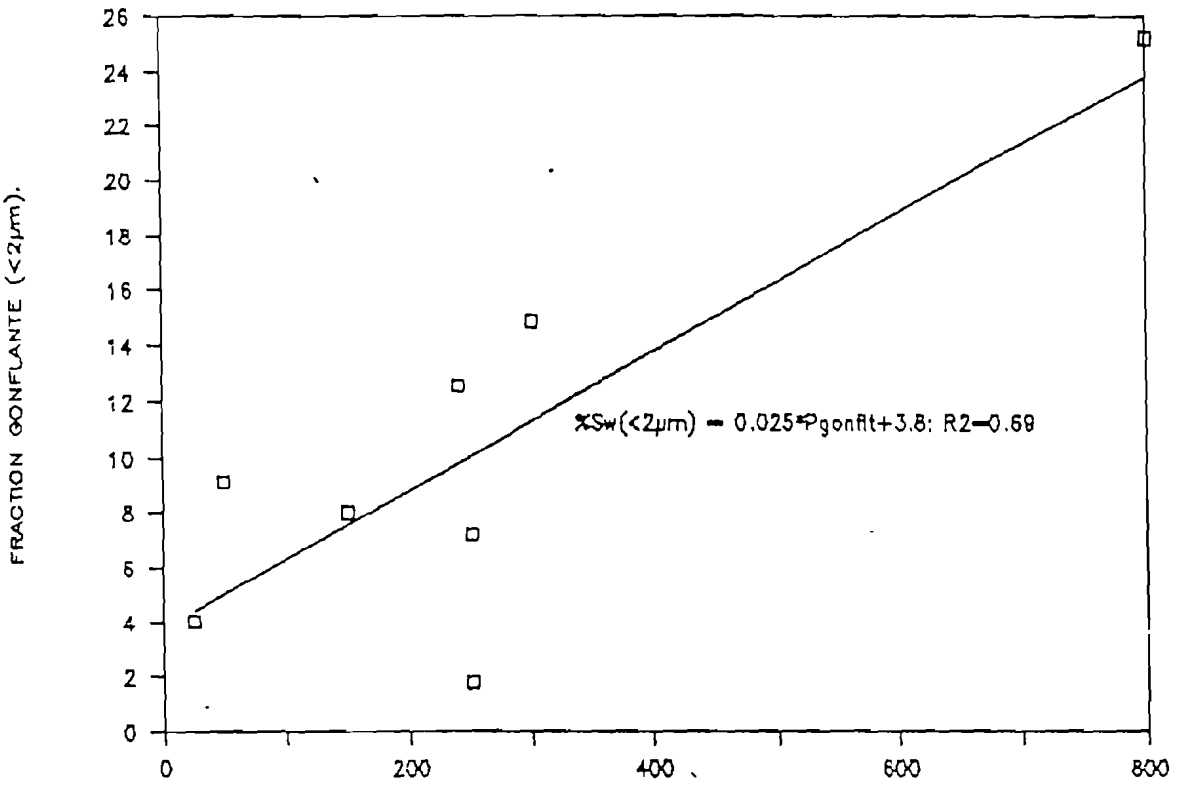


Figure 59 : PRESSION DE GONFLEMENT (KN/m2).

boratoire: ce sont des sols dits difficiles. On a intérêt à se fier aux essais in situ).

Par ailleurs, les erreurs commises dans la semi-quantification des minéraux smectitiques par DRX, sont autant de facteurs limitatifs.

De ce qui précède, il convient de proposer des possibilités de modification du comportement gonflant des vertisols des sites étudiés, voués à la construction des ouvrages du génie civil (routes) et des habitations:

- **la saturation potassique des smectites sur les sites.**

Les smectites de transformation (Sm_T), de 14Å (N), voient, par cette opération, leur espacement basal irréversiblement stabilisé à 10Å (N) sans possibilité de gonflement ultérieur.

Cette propriété pourrait être mise à profit en génie civil si techniquement et économiquement il était possible de saturer ces argiles smectiques à l'aide d'un sel potassique. Cette proposition nécessite d'abord une vérification au laboratoire. Si les expériences s'avèrent concluantes, une étude de faisabilité devrait être établie.

L'agradation des smectites en "illites" est régulièrement observée dans les sols amendés avec des angrais potassiques (Mathieux repris par Goemaere, 1991).

Felipe-Morales, 1970 (repris par Goemaere, 1991) indiquent que la saturation peut s'effectuer fortement par simple mélange d'un sol smectitique sec et de sels potassiques.

L'intérêt ou non d'une telle saturation est déterminée par une qualification correcte de ces smectites et leur estimation quantitative.

L'étude minéralogique fine des smectites et argiles smectiques du Burundi, montre que cette saturation potassique serait surtout efficace pour le site de BUJUMBURA et, dans une moindre mesure, dans les régions de NYANZA-LAC, RUMONGE et IMBO-CENTRE, et enfin, sans influence dans l'IMBO-NORD.

Comme solution plus économique, nous retenons la proposition de construire une couche de graviers sableux sous la fondation pour augmenter la pression admissible appliquée par la fondation et diminuer la pression de gonflement.

Enfin, il faut remarquer que du point de vue géotechnique, il est délicat d'extrapoler, latéralement et/ou verticalement, les résultats minéralogiques obtenus au départ de puits éloignés. D'importantes variations latérales et /ou verticales des faciès à courte distance, impliquent des fluctuations importantes dans l'extension des dépôts à caractères vertisoliques. Une caractérisation minéralogique efficace de ces argiles à vocation géotechnique, consisterait en un relevé systématique (de proche en proche, à une maille serrée) de chaque tranchée ou fondation.

IV.2. Aspect agricole des matériaux sectitiques.

Les smectites présentent un intérêt agricole d'une importance capitale. Elles contribuent à la nutrition des plantes car elles servent de réservoir aux ions nutritifs qu'elles cèdent aux racines.

Les sols à smectites sont naturellement potentiellement fertiles. La Capacité d'Echange Cationique (C.E.C) de ces derniers a été mesurée au Burundi, sur la fraction < à 2µm extraite de vingt-et-un échantillons représentatifs des différentes aires géographiques étudiées.

Résultats des mesures de la C.E.C: Annexe V: tableau 3).

Les valeurs obtenues s'échelonnent entre 25 et 107 méq/100grs. Les plus élevées de celles-ci sont obtenues sur les vertisols paléotopomorphes de l'Imbo-Nord, qui sont constitués presque exclusivement de smectites (II.1.5).

Le lien direct unissant nature minéralogique et C.E.C permet de proposer une relation entre la C.E.C mesurée sur la fraction < à 2µm et le pourcentage en minéraux gonflants dans cette même fraction. (Fig. 53). Ce type de relation présente néammoins des limites dans son application (Goemaere, 1991):

- la DRX ne s'intéresse qu'aux composés cristallisés (les composés amorphes ne peuvent tout au plus qu'être détectés parfois par augmentation du bruit de fond dans les grands angles);
- la présence de matière organique est connue;
- le pourcentage de smectites s.l. dépend de la méthode de quantification et est influencé par l'état de cristallinité;
- la quantification a été effectuée sur les seuls phyllosilicates de la fraction < à 2µm. La surestimation du pourcentage de smectites sera proportionnelle à l'abondance du quartz et des feldspaths. En pratique, les diffractogrammes montrent une faible participation des minéraux non phyllosilicatés, ainsi peut-on, en première approximation, négliger ce facteur.

Une bonne relation entre le pourcentage de minéraux gonflants (smectites s.s, interstratifiés irréguliers à feuillets gonflants et, pour deux échantillons, la contribution de l'halloysite: 5 à 40 méq/100grs selon le taux d'hydratation) et la C.E.C mesurée, est montrée par le calcul de la droite de régression linéaire (coefficient de corrélation de 0,74 pour une population n de 37 échantillons. (Fig. 53). Quatre échantillons se situent en dehors de la tendance. Ils présentent une C.E.C. élevée, tout en possédant un faible contenu en minéraux gonflants. Ces échantillons (9352, 9358, 9362 et 9363) ont été exclus de la régression linéaire et sont identifiés sur le graphique par un symbole différent. Ces valeurs "anormales" en regard de la minéralogie, reflètent la présence de matières organiques fortement humifiées, et/ou d'un complexe argilo-humique, induisant une augmentation sensible de la C.E.C (Goemaere, 1991). On peut aussi retenir, pour certains échantillons, la

possibilité d'une sous-estimation quantitative des minéraux smectitiques. En effet, certains smectites (9352, 9363) se présentent, au naturel(N), sous forme d'une réflexion mal élaborée, très élargie et culminant vers 15 - 16Å. Mesuré au glycol, l'indice V/P est faible. Après glycolage, la réflexion culmine vers 18Å.

L'établissement d'une telle relation entre C.E.C et pourcentages de minéraux gonflants, est rendu possible par l'absence de vermiculites (100-150méq/100grs) dans l'assemblage minéralogique et, grâce au contraste sur le plan de la C.E.C, entre les minéraux smectitiques à C.E.C élevée (80 à 150méq/100grs) et le groupe des illites (10 à 40méq/100grs)- kaolinites (3 à 15méq/100grs) à C.E.C faible.

La potentialité liée à la richesse en contenu minéral smectitique des vertisols, est cependant limitée par les difficultés rencontrées lors de l'exploitation de ces derniers. En effet, la potentialité correspond à la productivité des vertisols lorsque tous les aménagements possibles ont été réalisés.

La fertilité d'un sol est sous la dépendance de très nombreux facteurs. Outre la richesse chimique liée à la réserve minérale, la structure, la texture et le drainage sont des éléments qui joueront un rôle limitatif dans la productivité des vertisols. En particulier, les propriétés hydriques sont difficiles à maîtriser dans ces argiles: en saison sèche, la structure est massive, compacte et fissurée, tandis qu'en saison des pluies, elle est continue et très plastique. En raison des teneurs en $Na_{échangeable}$ et en $Mg_{échangeable}$ (parfois > à 15% de la C.E.C) qui ont la propriété de disperser les argiles, celles-ci sont instables en périodes pluvieuses. Cela pèse lourdement sur l'efficacité des méthodes d'irrigation et de drainage ("sols difficiles").

On ne peut pas régler le problème des vertisols en agriculture par "une phrase". Comme solution lors de l'aménagement de ces argiles, il faudrait contrecarrer les effets physiques induits par les ions dispersants par apports de matières floculants (gypse, plâtre...) qui échangeraient Na et Mg par Ca.

Au Burundi, cette solution est malheureusement plus idéaliste que pratique. Par ailleurs, même les argiles riches en Ca^{++} posent des difficultés lors de l'exploitation à la main car elles possèdent des agrégats de grandes dimensions (dû au fait que cet ion a la particularité de favoriser la floculation à l'inverse du Na et Mg). La seule solution pratique consiste à maîtriser l'eau d'abord (par des travaux de génie rural) par des canaux pour drainer le trop plein quand il pleut et pour amener assez d'eau quand il fait sec; cette eau pour irrigation devant être la plus désalinisée possible (pas celle de la Rusizi) pour ne pas accentuer le problème de salinité. Ensuite, une agriculture mécanisée est à conseiller dans ces sols pour des facilités dans le labour.

Bréf, ce sont des sols difficiles, voire même impossibles à aménager et sont ainsi souvent destinés au pâturage.

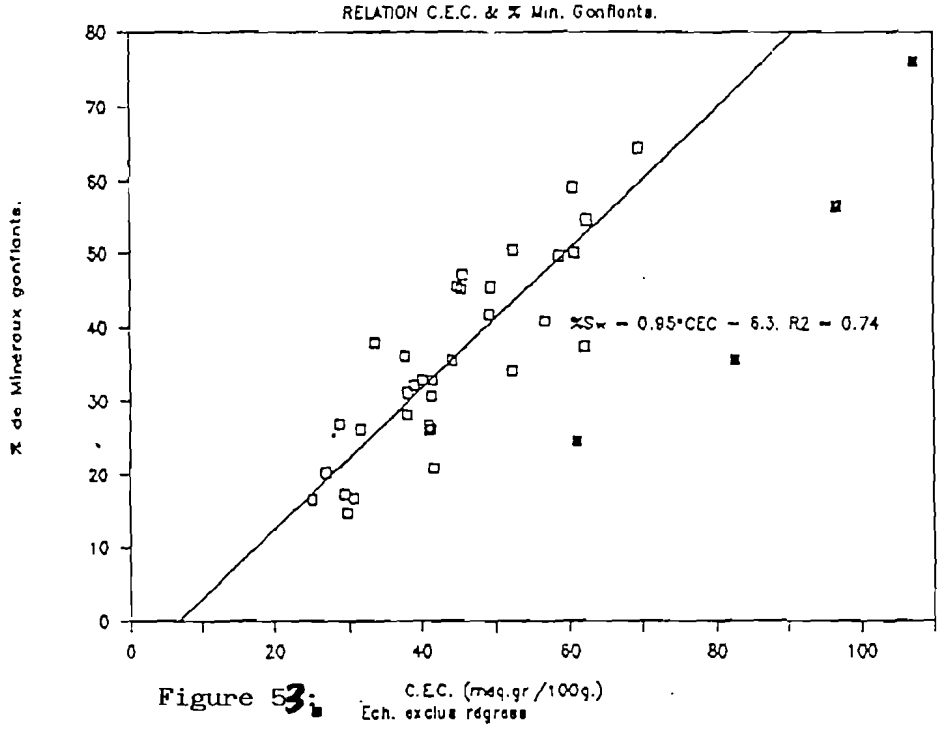

RELATION C.E.C. & % Min. Gonflants.
% de Minéraux gonflants.
%Sm = 0.95*CEC - 6.3. R2 = 0.74
C.E.C. (meq.gr/100g.)
Ech. exclus régress
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
20
40
60
80
100

Figure 53

IV.3. Aspect industriel des matériaux smectitiques.

Dans le but de lancer une éventuelle industrie locale de céramique à base de kaolin, une première campagne de prospection des smectites du Burundi n'a pas fourni de résultats satisfaisants (Chartry, comm.pers.). Toutefois, la DRX à partir des échantillons récoltés dans certains sites (Imbo-Nord par exemple), donne des résultats encourageants pour utiliser les smectites comme matière première de la céramique. (Annexe III.4).

Dans l'avenir, nous proposons une campagne de réalisation des essais y relatifs.

La possibilité de l'utilisation de smectites dans la cimenterie pour la fabrication de pouzzolanes, est infirmée dans cette étude. La proportion magnésienne est un facteur limitatif pour une telle utilisation.

Enfin, nous espérons que certains des résultats de cette étude, contribueront, dans un avenir proche, à une meilleure mise en valeur de ces argiles.

@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@

ANNEXE III: ANALYSES MINERALOGIQUES AUX RAYONS-X: METHODOLOGIE; CLASSIFICATION et COMPARAISON. *LIX*

III.1. Tests en routine sur agrégats orientés (A.O) (fraction < 2µm). *LIX*

III.2. Diffractométrie d'A.O. après saturation à l'hydrazine (HYD). *LXIII*

III.3. Faciès des réflexions (001) au naturel(N) des smectites. *LXIII*

III.4. Résultats analytiques de la diffractométrie d'A.O. (Tableaux 1 à 6). *LXIV*

III.5. Autres paramètres calculés sur diffractogrammes d'A.O. *LXX*

III.6. Résultats des mesures des paramètres de cristallinité et des intensités des réflexions des A.O. (Tableaux 1 à 5). *LXXI*

III.7. Les post-traitements des A.O.: saturations cationiques $(Li^+;K^+)$. *LXXVII*

III.8. Diffractométrie sur préparations désorientées: méthode des poudres désorientées (p.d). *LXXXI*

III.9. Résultats de la diffractométrie sur p.d. (sur roche totale) de quelques échantillons choisis. (Intensités des réflexions principales). *LXXXII*

III.10. Comparaison des cristallinités des smectites en fonction des localités. *LXXXIV*

ANNEXE IV: ANALYSES CHIMIQUES. *LXXXV*

IV.1. Mode opératoire adopté à Liège pour l'analyse des smectites de l'Imbo-Nord. *LXXXV*

IV.2. Résultats des analyses chimiques effectuées à Liège. *LXXXV*

IV.3. Résultats (bulletins) analytiques des pédologues (ISABU). Chimie des vertisols. *LXXXVI*

IV.4. Comparaison entre les analyses chimiques effectuées à Liège et les données analytiques des pédologues de l'ISABU. *XCII*

IV.5. Conclusion générale des analyses chimiques. *XCII*

ANNEXE V: QUELQUES CARACTERISTIQUES GEOMECANIQUES (Tableaux 1 et 2) ET AGRICOLES (Tableau 3). *XCIII*

ANNEXE I: OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTION DES PROFILS.

ANNEXE I.1. OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTION DES PROFILS DANS LA REGION DE L'IMBO-NORD.

I.1.1. Observations de terrain.

Les échantillons prélevés lors des travaux de terrain, portent les mêmes numéros que les points d'observation.

1: - Dans une gravière (ancienne carrière) en retrait et à gauche de la RN.5, graviers constitués de galets mal calibrés de quartz filonnien, de quartzite et d'amphibolite, formant une couche alluvionnaire dont l'épaisseur varie de un à trois mètres, et reposant sur une coulée de lave basaltique. Les produits d'altération du basalte observés en-dessous de la gravière, sont, d'une part, des blocs arrondis de laves basaltiques vertes ou noirâtres (altération en "boules") et une argile résiduelle verte lardée de multiples petites fentes de retrait (de largeur millimétrique à centimétrique).

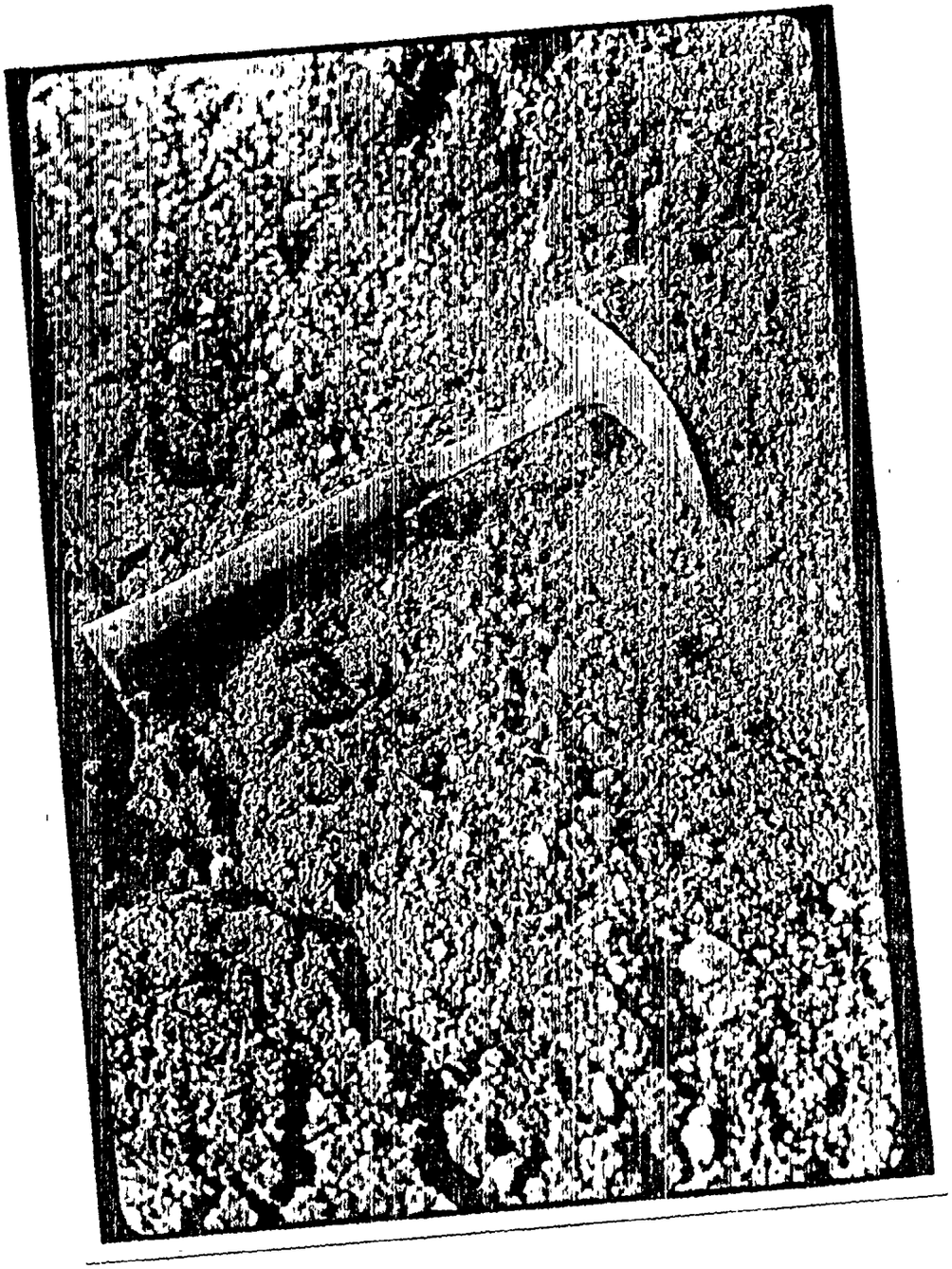
- On note l'absence de galets de la lave basaltique sous-jacente (ni son produit d'altération) dans la gravière.

- Dans le paysage, possibilité de contrôle de l'extension des gravières (zones non habitées) et de leur sens de formation selon les cours principaux des rivières actuelles.

1' Dans la gravière, endroit-type de localisation du bois-fossile dans une terrasse associée à des plages de vertisols qualifiés de "lithomorphes" par les pédologues de l'ISABU.

2: Après la gravière, sols bruns cultivés.

3: Niveau kaolinitique dans les gravières de devant l'église de pentecôte de Cibitoke, formant une espèce de "poche" recouverte par des galets quartziques arrondis.



4: Derrière l'église, plage de sol noir avec des fentes de dessication, très argileux, plastique collant (argile noire).

Dans ces argiles, présence de beaucoup de galets (dans une plage légèrement incliée ver l'Ouest) qui forment du gravier noyé dans de l'argile. L'ensemble constitue un sol graveleux mélange (mal classé) de gravier+ sable+ argile noire.

5: - Dans la tranchée le long de la route (RN.5), dans une plage de sol noir à brun foncé, présenc de petits galets, millimétriques à centimétriques, formant de petites "lentilles" interstratifiée dans l'argile noire.

- Même observation dans les zones labourées, avec une quantité variable de galets dispersé dans les argiles noires. (Cfr diapositive n° 1).

5' - Au km 65, après la T_5: mêmes observations que précédemment. Alternance des zones à argile noires et des gravières.

- A gauche de la RN.5, même observation, avec la formation graveleuse qui forme une "lentille dans la plage à argile noire.

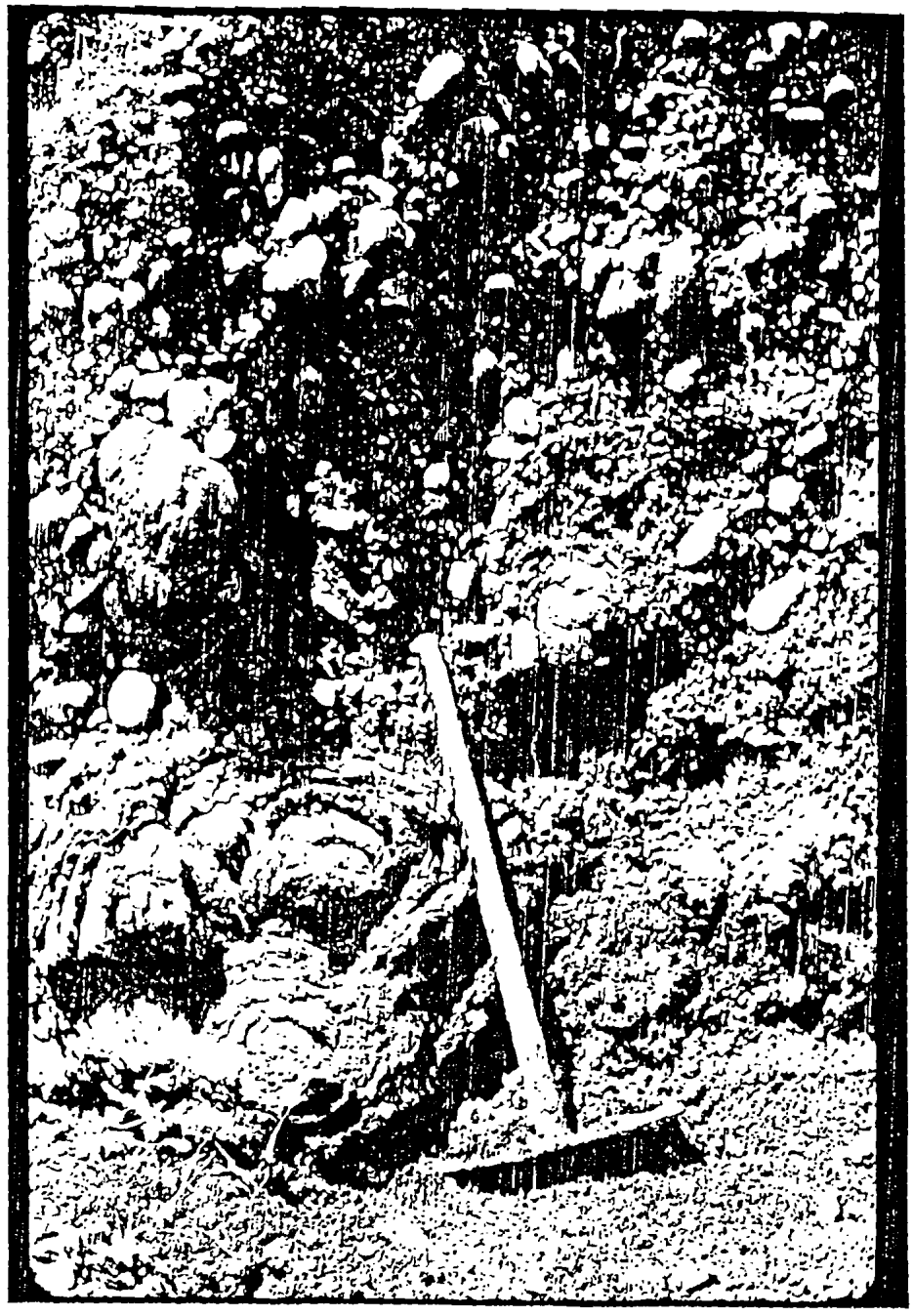
6-7 Près de l'ancien pont de la Nyamagana, affleurement de basalte tholéiitique. en voie d'altération; en "boules" (diapositive n° 2). L'échantillon 6 est prélevé dans le produ d'altération jaunâtre, surmonté par un horizon argileux, lardé de multiples fentes de retra (millimétriques). (Echantillon pris pour analyse, présence de smectite??).

- Ce profil montre nettement le contact entre la formation graveleuse et l'argile résiduel d'en-dessous. Cette dernière montre une variation transitionnelle des argiles d'altération depu le basalte ----> argile jaunâtre mêlée à des débris du basalte sous-jacent----> horizon argileu plus évolué dans l'altération.

8-9 Endroit-type où les pédologues ont décrit les vertisols comme étant "lithomorphes".

- Echantillon n°9 pris dans un long profil (4- 5m): argile noire, mêlée avec des galets, de form et dimension variables (certains sont arrondis et d'autres anguleux). Cette argile couvre d rectement le basalte (très faiblement altéré en "boules"). Pas de variation transitionnelle da le profil de l'argile noire.

10: - Dans un profil localisé sur la T_4, près de la petite source qui alimente le petit lac Dogo-Dog argile noire très plastique et collante, avec de larges fentes de dessication dans l'horiz superficiel qui inclut de petits galets (millimétriques à centimétriques) arrondis de quar (Echantillonnage tous les 25Cm dans le profil). L'échantillon de profondeur (160Cm) mon des taches de rouilles.



11: - Dans une carrière ouverte à gauche de la RN.5, près de la T_4, basalte à moins d'un mètre en-dessous d'une argile noire. Parfois, le basalte affleure jusqu'à la surface, avec des blocs d'altération sphéroïdaux.
- A un peu moins de 10m du point (11), association des galets quartziques (vus précédemment) et de l'argile noire, à la même altitude du point (11). (Echantillonnage tous les 20Cm: 0 - 20Cm; 60 - 80Cm; 80 - 100Cm (on atteint une croûte calcaire).

12_1: Sur le talus de la RN.5, avant le pont frontalier de la Ruhwa: terre rouge d'altération du basalte, localisée entre deux épisodes de coulées de laves basaltiques, la première étant alvéolaire et la seconde massive. (Altération ferralitique du basalte).

12_2: Dans le front d'une carrière abandonnée (d'environ 100m de long et 6m de hauteur), en retrait de la RN.5: superposition de deux coulées subhorizontales de laves basaltiques alcalines, altérées en "boules", vacuolaires à massives et diaclasées.
- Au sommet de la coulée inférieure, on observe un sol-fossile ferralitique rouge, argileux, luisant, se débitant en "polyèdres" sur un mètre d'épaisseur au maximum (sol résultant de l'effet de "cuisson"). Ce sol se développe irrégulièrement, avec des discontinuités locales et des restes de basalte en voie d'altération. La surface supérieure de ce sol est tronquée; contact tranché et net, subhorizontal avec la coulée supérieure.

13: (Sur la T_3): Croûtes massives de "calcaires" ("calcrètes" ou "caliches") formant des masses continues dans un sol noir.

14: - Echantillonnage dans un profil localisé à environ 5m de la T_4 (à gauche). A environ 150Cm de profondeur, on atteint la croûte carbonatée.

15: - Sur la rive gauche du petit lac Dogo-Dogo, argile noire très plastique, avec des concrétions carbonatées dès la surface du sol.
- Echantillonnage dans les 20Cm de l'horizon superficiel.
- Dans les profils faits par le Service Géologique, les masses de concrétions carbonatées ont des épaisseurs qui atteignent 2,5m.

16: - Dans la terrasse de la Rusizi (= unité géomorphologique, récente dans l'Histoire du Rift, dont la transition avec les formations anciennes, est brutale et est caractérisée par une falaise correspondant à une faille), présence de micro-reliefs (micro-levées formées de galets de roches volcaniques de la province du Sud-Kivu et d'autres roches, de dimension et forme

variable, apportées du Nord du Burundi par la Rusizi) et de mini-dépressions dans lesquelles se forme un sol avec des propriétés vertiques ("régosol mélanique") associé à des galets. (Echantillons 4 et 5).

17: - Sur la T_5 (sur la rive droite de la source qui alimente le lac Dogo-Dogo: argile noire très plastique, dans une plage déprimée, temporairement exondée (dépression du Dogo-Dogo très mal drainée). On note la présence des fentes de dessication à la surface. (Cfr Annexe I.1.2: profil W8). Echantillonnage tous les 20Cm de 80Cm à 120Cm.

18: - Sur la rive droite du canal drainant le lac Dogo-Dogo: argile noire avec des fentes de dessication, de largeur variable (millimétrique à centimétrique, voire même décimétrique). Ces argiles montrent des faces obliques bien striées (miroirs de glissement) qui caractérisent de gros prismes, donnant naissance à des "polyèdres" anguleux. Présence de galets de quartz (arrondis et anguleux) qui augmentent en quantité du bas vers l'horizon superficiel.

19: Niveau d'argile noire avec des intercalations de niveaux "lenticulaires" fortement graveleux, interstratifiés à plusieurs endroits de la rive droite du canal drainant le Dogo-Dogo. (Cfr diapositive n° 3).



I.1.2. Description des profils (Service de l'ISABU).

Profil n°INO 1.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil:	INO 1.
Unité supérieure de classification:	Vertisol.
Date de description:	17/07/1980.
Auteur de la desription:	Opdecamp L.; Bigura C.
Localisation:	Rukana.
Altitude:	860m.

Géomorphologie:
- position topographique de la station: plaine.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: ondulée.
- micro-relief: néant.

Pente à l'emplacement du profil: 4%

Utilisation du sol: cultivé.

Climat: (Aw_4)s; tropical humide à 4 mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Drainage:	modéré à normal.
Etat hydrique:	légèrement frais.
Profondeur de la nappe phréatique:	supérieure à 2m.
Pierrosité superficielle:	non pierreux.
Affleurement rocheux:	non rocheux.
Traces d'érosion:	non détectées.
Présence de sels ou d'alcalis:	non détectée.
Influence humaine:	fraîchement labouré.

III. Description des horizons.

Ap ----> 0 - 20Cm: Noir (5YR 2.5/1.5) frais; argileux lourd, sables très fins, polyédrique subangulaire, grossier, moyen, modérément bien développé; plastique et collant; assez nombreux pores tubulaires fins et grossiers; racines nombreuses, fines et moyennes; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 1-1.

A/C ---->20 -40Cm: Brun rouge foncé (5YR 3/2) frais; argileux très lourd, sables fins; polyédrique subangulaire moyen, modérément bien développé; plastique, collant; quelques faces de pression; nombreux pores tubulaires fins et moyens; racines peu nombreuses, fines et moyennes; larges fentes de rétraction verticale jusqu'à 50Cm; transition distincte et régulière; échantillon INO. 1-2.

C_1 ---->40-90Cm: Brun rouge foncé (5YR 3/2); argileux très lourd, sables fins; polyédrique angulaire; bien développé; très plastique; nombreux slickensides; assez nombreux pores fins tubulaires; racines peu nombreuses, fines et moyennes; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 1-3.

C_2 ---->90- 160Cm: Brun rouge foncé (5YR 3/3) et ocre-rouge (5YR 5.5/6) frais; argileux très lourd; massif; très plastique, collant; quelques slickensides; assez nombreux pores tubulaires, fins, moyens; racines rares à absentes; échantillon INO. 1-4.

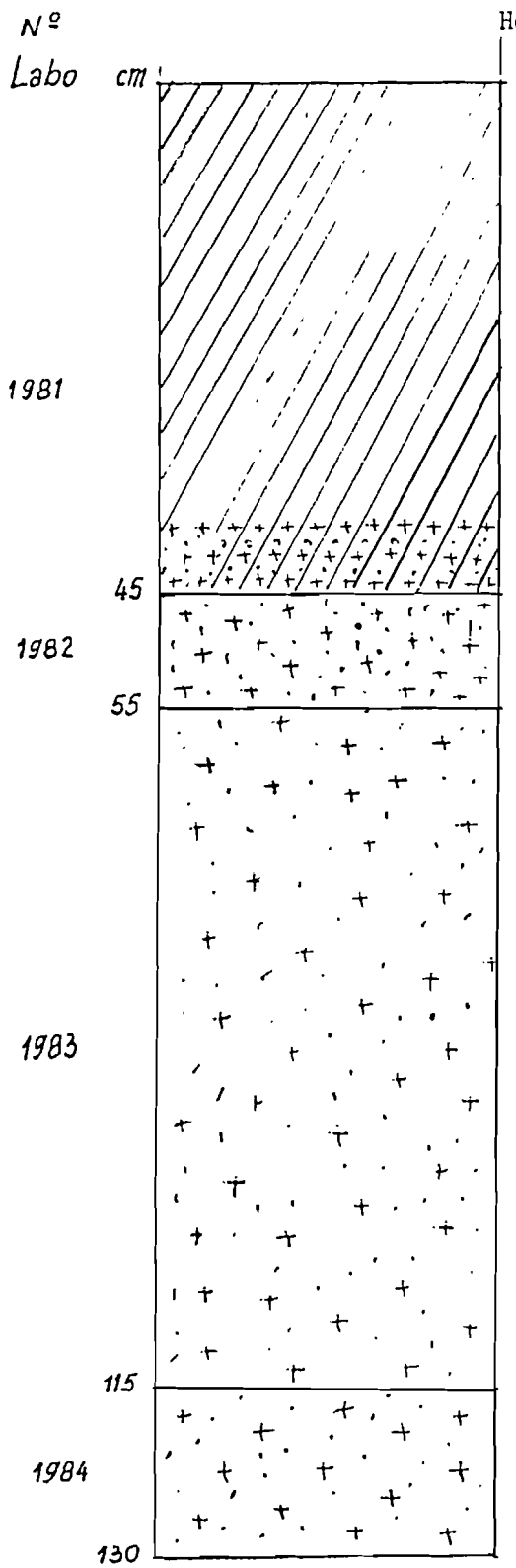
Profil W2

1. N°:	195.
2. Auteur:	Rolland J.
3. Date du prélevement:	19/08/77 (saison sèche).
4. Localisation:	plaine de la Rusizi - Mparambo (Rujembo), prolongement de la T_4, séquence I.
5. Pente:	0% (légère ondulation au sommet).

Altitude:	± 860m.
6. Couvert végétal:	épineux, herbes sèches, arbustes.
7. Drainage externe:	bon.
8. Drainage interne:	bon.
9. Horizon humifère:	bien développé.
10. Système racinaire:	bien développé jusu'à 45Cm.
11. Charge graveleuse:	galets roulés quartzitiques et basaltiques.
12. Matériau originel:	limon argilo-sableux, brun foncé.
13. Faits particuliers:	structure massive.
14. Développement du profil	A - L.
14.Classification:	INEAC: régosol mélanique.
	Classification Américaine: Pachic lithic haplustoll.

Profil W_2 : Régosol mélanique.

Description des Horizons.



- brun foncé (CH 7.5 YR 3/2).
- limon argilo-sableux légèrement micacé, radicelles nombreuses, nombreuses concrétions (diamètre 1 mm) argilo-sabloneuses ou sableuse massif.

Vers 45 cm : galets roulés (petits diamètres 0.3-0.6 cm)

Transition nette et régulière

- brun rouge foncé (CH 5 YR, 3/3-4/3).
- Sablo-argileux limoneux peu ferme en place. Charge très importante de galets roulés basoltiques de toute diamètre et toute forme. Quelques débis rocheux (quartzites fins, micacé peu nombreux et dispersés - radicelles peu nombreuses.

Transition nette et régulière.

- brun rouge (CH 5 YR 4/4)
- Sablo - orgileux, limoneux, légèrement micacé meuble en placé, galets roulés très nombreux et basaltiques (diamètre 0.2 - 0.5 cm et 5cm)

Profil n°INO. 4.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil: INO. 4.
Unité supérieure de classification: sol brun vertique salinique.
Date de la description: 17/01/1980.
Auteurs de la description: Opdecamp L; Bigura C.
Localisation: bloc Mbaza à Rukana.
Altitude: 840m.
Géomorphologie: - position topographique de la station: plaine au pieds d'un éperon métamorphique.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: ondulée.
- micro-relief: néant.
Pente à l'emplacement du profil: 10%; modérée.
Utilisation du sol: cultivé.
Climat: (Aw_4)s; tropical humide à 4 mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Drainage: normal.
Etat hydrique: sec.
Profondeur de la nappe phréatique: supérieure à 2m.
Pierrosité superficielle: très peu pierreux.
Affleurement rocheux: non rocheux.
Traces d'érosion: néant.
Présence de sels ou d'alcalis: non détectée.
Influence humaine: coton.

III. Description des horizons.

Ap ---> 0 - 10Cm: Noir (5YR 2/1) frais; argileux lourd, sables fins; polyédrique, subangulaire, grossier, modérément bien développé; plastique et collant; nombreux pores tubulaires fins et moyens; racines peu nombreuses fines et moyennes; fentes de rétraction verticales de 1Cm de large jusqu'à 60Cm; transition distincte et ondulée; échantillon INO4-1.

10.Système racinaire:	peu développé.
11.Charge:	concrétions calcaires, rares quartzites anguleux blancs jusqu'à 40Cm.
12.Matériau originel:	argileux, lourd à très lourd, collant, brun foncé à brun-rouge foncé.
13.Faits particuliers:	nombreux revêtements argileux, fentes de dessication très nombreuses et larges.
14.Développement du profil:	A - C -R.
15.Classification:	INEAC: Argiles noires tropicales bien drainées (sol vertique brun foncé). Classification Américaine: Lithic Udicchromustert.

Profil E7

1. N°	214.
2. Auteur:	Rolland.
3. Date de prélevement:	21/02/78.
4. Localisation:	plaine de la Rusizi - Mparambo T_5, à 4050m de la Rusizi. Séquence I.
5. Dépression:	pente 0%.
Altitude:	922m; 72m au-dessus de la Rusizi.
6. Couvert végétal:	herbes grasses et quelques épineux.
7. Drainage externe:	très lent.
interne:	très mauvais.
8. Horizon humifère:	bien développé.
9. Système racinaire:	bien développé jusqu'à 40Cm.
10. Charge graveleuse:	charge peu importante de concrétions calcaires ou siliceuses blanches, friables.
11. Matériau originel:	argileux, lourd, très collant, noir à brun-gris foncé (minéraux du type 2/1).
12. Faits particuliers	structure polyédrique, slickensides, fentes de rétraction très larges et profondes, mottling souvent condensé aux environs des racines, diminue en profondeur.
13. Développement de profil:	A - C.

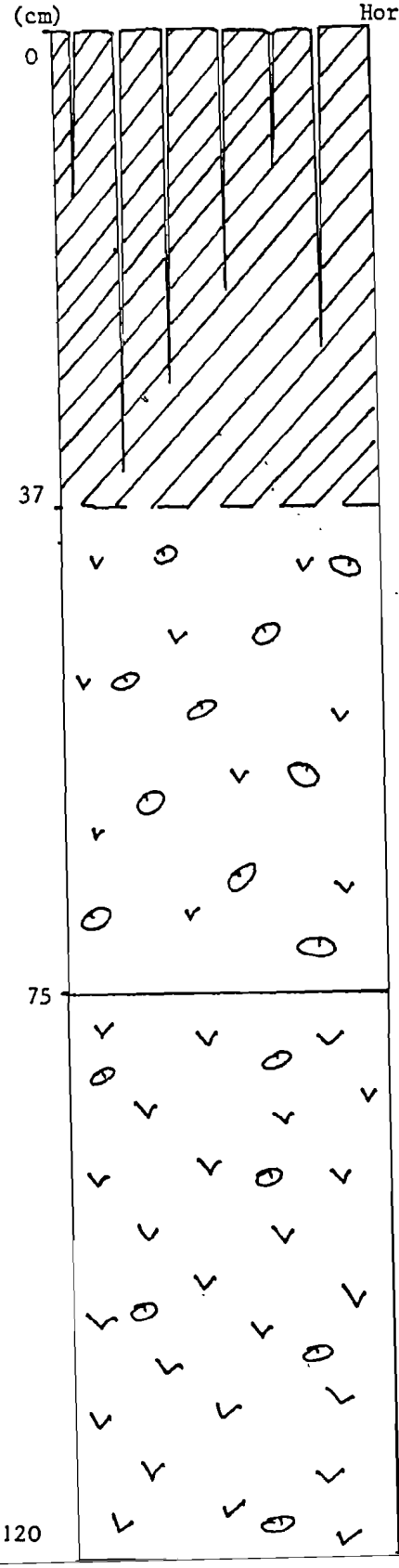
14. Classification INEAC: argiles noires tropicales à hydromorphie intergrade régosols salés.
Classification Américaine: udic pellustert.

Profil W8

1. N°	214.
2. Auteur:	Rolland.
3. Date de prélevement:	21/02/78.
4. Localisation:	plaine de la Rusizi - Mparambo T_5, à 4050m de la Rusizi. Séquence I.
5. Dépression:	pente 0%.
Altitude:	922m; 72m au-dessus de la Rusizi.
6. Couvert végétal:	herbes grasses et quelques épineux.
7. Drainage externe:	très lent.
interne:	très mauvais.
8. Horizon humifère:	bien développé.
9. Système racinaire:	bien développé jusqu'à 40Cm.
10. Charge graveleuse:	charge peu importante de concrétions calcaires ou siliceuses blanches, friables.
11. Matériau originel:	argileux, lourd, très collant, noir à brun-gris foncé (minéraux du type 2/1).
12. Faits particuliers	structure polyédrique, slickensides, fentes de rétraction très larges et profondes, mottling souvent condensé aux environs des racines, diminue en profondeur.
13. Développement de profil:	A - C.
14. Classification:	INEAC: argiles noires tropicales à hydromorphie intergrade régosols salés.
	Classification Américaine: udic pellustert.

Profil W8 Argiles noires tropicales à hydromorphie

Description des horizons



- noir (CH 10 YR 2/1)
- argileux très lourd, très collant (min. 2/1)
- structure forte, polyédrique subangulaire et angulaire moyenne en surface, fine en profondeur nombreuses fentes de rétraction, quelques revêtements argileux vers 30 cm -
mottling intense, en plages rouge brique, souvent condensés aux environs des racines, diminuant en profondeur - radieelles très nombreuses.

Transition diffuse et régulière
- gris très foncé (CH 10 YR 3/1)
- argileux très lourd, très collant (min 2/1)
- structure polyédrique angulaire fine et satble queslques slidkensides - charge peu importante de concrétions calcaires friables (diam. 0.1 à 0.4 cm) rondes et quelques angulaires ; radicelles rares à-absentes.

Transition distincte et régulière
- brun gris foncé (CH 10 YR 4/2)
- argileux très lourd, très collant (min 2/1), compac structure forte, bien développée, fine à très fine, stable - nombreuses slickensides larges et striés légères traces de mottling - quelques concrétions calcaires, blanches (5 %) diam. 0.2-0.5 cm.

Profil n°INO. 8.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil:	INO.8.
Unité supérieure de classification:	vertisol hydromorphe.
Date de la description:	22/01/1980.
Auteur de la description:	Opdecamp L.
Localisation:	Transversale n°5 à Mparambo; 100m à l'Est de la route.
Altitude:	835m.

Géomorphologie: -position topographique de la station: dépression hydromorphe.
-géomorphologie de la zone circonvoisine: ondulée.
-micro-relief: néant.

Pente à l'emplacement du profil: 1 à 2%; quasi-nulle.

Utilisation du sol: couvert naturel.

Climat: (Aw_4)s; tropical humide à 4 mois de saison nèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Drainage:	pauvre.
Etat hydrique:	légèrement frais.
Profondeur de la nappe phréatique:	2 à 3m.
Pierrosité superficielle:	non pierreux.
Affleurement rocheux:	non rocheux.
Traces d'érosion:	néant.
Présence de sels ou d'alcalis:	possible, non détectée.
Influence humaine:	néant; couvert végétal et arbustif.

Profil n° INO. 15.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil: INO.15.
Unité supérieure de classification: vertisol hydromorphe.
Date de la description: 30/01/1980.
Auteur de la description: Opdecamp L.
Localisation: entre T_1 et T_2, Murambi.

Altitude: 840m.
Géomorphologie: - position topographique de la station: légère dépression.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: ondulée.
- micro-relief: buttes de manioc.
Pente à l'emplacement du profil: 3%; faible.
Utilisation du sol: cultivé.
Climat: (Aw_4)s; tropical humide à 4mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Drainage: modéré.
Etat hydrique: légèrement frais.
Profondeur de la nappe phréatique: supérieure à 2m.
Pierrosité superficielle: non pierreux.
Affleurement rocheux: non rocheux.
Traces d'érosion: néant.
Présence de sels ou d'alcalis: non détectée.
Influence humaine: cultures de manioc ou de maïs.

III. Description des horizons.

Ap --> 0 - 30Cm: Brun rouge foncé (5YR 3/2); argilo-sableux fin à argileux lourd; polyédrique subangulaire moyen, faiblement développé; plastique, peu collant; nombreux pores tubulaires, toutes dimensions; racines assez nombreuses, moyennes et grossières; transition distincte et ondulée; échantillon INO. 15-1.

A/C-->30 - 65Cm: Brun-rouge foncé (5YR 3/2); argileux lourd; polyédrique subangulaire grossier, modérément bien développé; plastique et collant; assez nombreux pores tubulaires, moyens; racines rares à absentes; plus de 50% de faces de pression asscіées à quelques slickensides; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 15-2.

C-->65 - 125Cm: Noir (10YR 2/1); argileux très lourd; structure d'aspect massif mais sous-structure en coins; très plastique, collant; nombreux slickensides épais; assez nombreux pores tubulaires, moyens; racines rares à absentes; moins de 1% de galets quartzitiques; présence d'amas friables de carbonates au bas de l'horizon; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 15-3.

IIC-->125 - 160Cm: Brun-gris foncé (10YR 4/2) et brun foncé (10YR 4/3), argileux très lourd; massif; très plastique, collant; pores peu nombreux, fins, tubulaires; racines rares à absentes; 3% d'amas friables de carbonates, 2 à 5Cm de large; échantillon INO. 15-4.

Profil INO. 19.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil: INO. 19.
Unité supérieure de classification: argile noire tropicale.
Date de la description: 18/12/1979.
Auteur de la description: Opdecamp L.
Localisation: T_4 Kasenyi (Ouest).
Altitude: 820m.
Géomorphologie:
- position topographique de la station: plateau.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: plate.
- micro-relief: néant.

Pente à l'emplacement du profil: 1%; quasi-nulle.
Utilisation du sol: arbustif avec sous-couvert herbacé.
Climat: $(Aw_4)s$; tropical humide à 4 mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Drainage:	pauvre.
Etat hydrique:	frais.
Profondeur de la nappe phréatique:	peu profond.
Pierrosité superficielle:	non pierreux.
Affleurement rocheux:	non rocheux.
Traces d'érosion:	néant.
Présence de sels ou d'alcalis:	non détectée mais suspectée.
Influence humaine:	néant; couvert naturel.

III. Description des horizons.

A_1----> 0 - 25Cm: Noir (7.5YR 2.5/0); argilo-sableux; polyédrique subangulaire moyen, faiblement développé; peu plastique, peu collant, nombreux pores tubulaires fins, nombreux intersticiels moyens; racines nombreuses, fines et grossières; transition distincte et ondulée; échantillon INO. 19-1.

C_1(G)--->25-75Cm: Gris très foncé (5Y 3/1); argileux très lourd; structure en coin bien développée; plastique et collant; slickensides et faces de pression; peu nombreux pores tubulaires fins; racines peu nombreuses, fines; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 19-2.

C_2 -->75-130Cm: Olive foncé (5Y 5.5/3); argileux très lourd; polyédrique angulaire, faiblement développé; plastique et collant; rares faces de pression; racines rares à absentes; concrétions latéritiques; échantillon INO. 19-3.

C_3C_a ->150Cm (sonde) Olive pâle (5Y 6/3); argileux très lourd; échantillon INO. 19-4.
A 170Cm, nombreuses concrétions carbonatées.

Profil n°INO. 23.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil: INO. 23.

Unité supérieure de classification: régogley en discordance sur matériau vertique.

Date de la description: 18/12/1979.

Auteur de la description: Opdecamp L.

Localisation: T_4 Ndava (Ouest).

Altitude: 830m.

Géomorphologie: - position topographique de la station: plateau.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: ondulée, localement valonnée (badlands).
- micro-relief: néant.

Pent à l'emplacement du profil: 2%; faible.

Utilisation du sol: cultivé périodiquement.

Climat: (Aw_4)s; tropical humide à 4 mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol.

Roche-mère: alluvions lacustres anciennes.

Drainage: pauvre à très pauvre.

Etat hydrique: frais.

Profondeur de la nappe phréatique: 60Cm.

Pierrosité superficielle: non pierreux.

Affleurement rocheux: non rocheux.

Traces d'érosion: système de badlands.

Présence de sels ou d'alcalis: non détectée.

Influence humaine: naturellement en jachère.

III. Description des horizons.

Ap ----> 0 - 13Cm: Gris très foncé (10YR 3/1); argilo-sableux fin; polyédrique fin, modérément bien développé; peu plastique, non collant;nombreux pores tubulaires, moyens et grossiers; assez nombreuses racines fines et moyennes; transition abrupte et régulière; échantillon INO. 23-1.

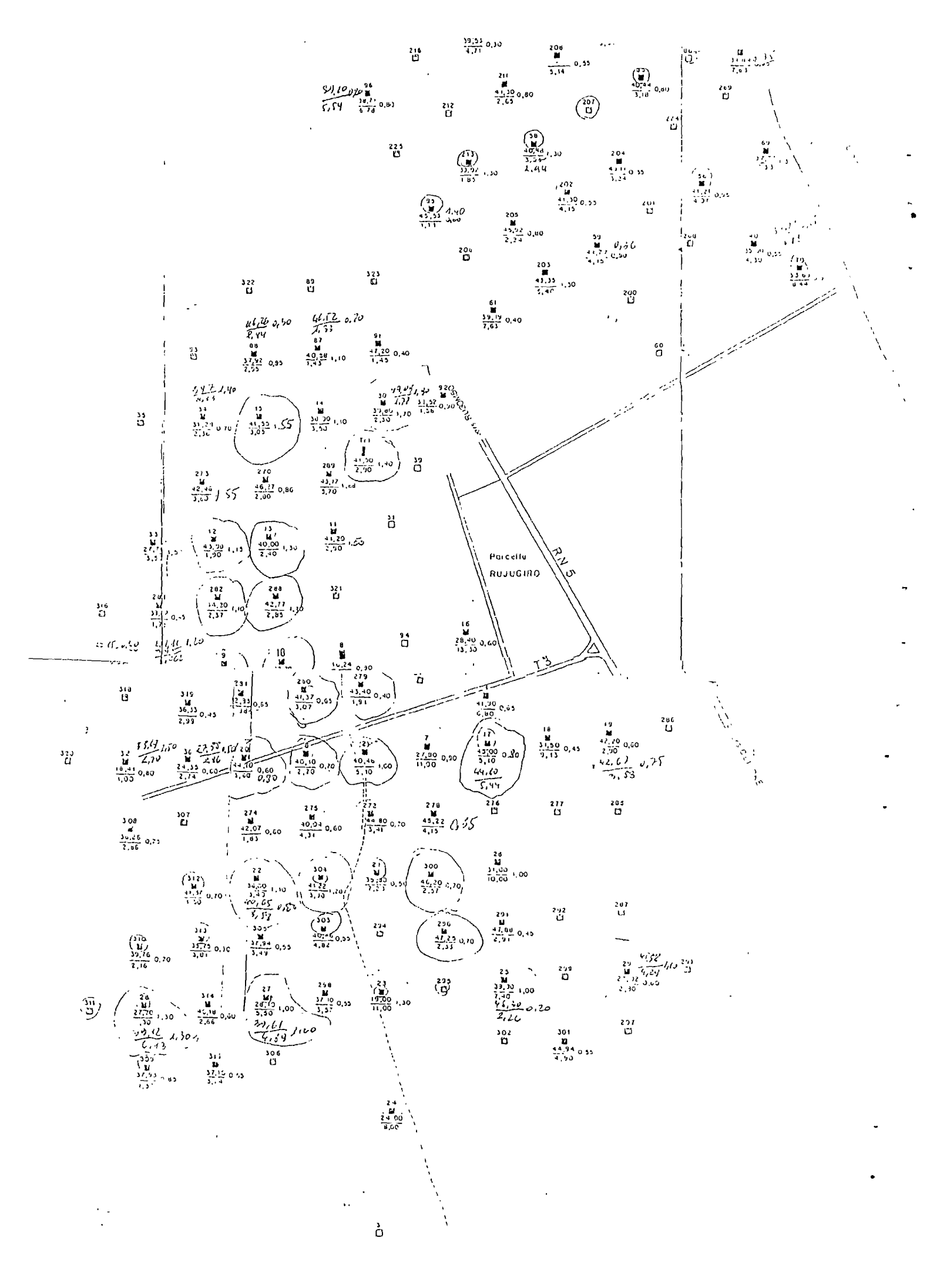
----> 13 - 30Cm: Brun-gris foncé (10YR 4/2); nombreuses taches fines à faible contraste; argilo-sableux fin à argileux lourd; polyédrique angulaire moyen à grossier, faiblement développé; peu plastique, non collant; peu nombreux pores tubulaires grossiers; racines assez nombreuses, fines et moyennes; transition distincte et régulière; échantillon INO. 23-2.

-----> 30 - 60Cm: Brun-gris foncé (5YR 4/2); nombreuses taches fines et distinctes, (2.5YR 3/6); argileux lourd; plastique et collant; assez nombreuses faces de pression; nombreux pores moyens et grossiers, tubulaires; racines peu nombreuses, fines; micacé; transition graduelle et régulière; échantillon INO. 23-3.

-- --> 60 - 110Cm: Gris foncé (5Y 4/1); argileux très lourd; nombreuses taches moyennes, proéminentes, (2.5YR 3/6); structure en coins; plastique et collant; slickensides et faces de pression; assez nombreux pores tubulaires, moyens et grossiers; racines rares à absentes;micacé; transition distincte et régulière; échantillon INO. 23-4.

IIIGG plus de110Cm Gris-olive (5Y 4/2); argileux très lourd; structure en coins; très plastique, très collant; slickensides; peu nombreux, pores tubulaires; racines rares à absentes; micacé; échantillon INO. 23-5.

ANNEXE I.3 Description des puits


Parcella
RUJUGIRO
RV 5
T3

DESCRIPTION DES PUITS - RUGOMBO III.

****

Puits	Profondeur(m)	Description du puits
1	0,0 - 0,15	Sol noirâtre
	0,15 - 0,80	Travertin blanc-jaune mélangé au sol sableux
	0,80 - 1,40	Travertin argileux blanchâtre peu effervescent à l'HCL
2	0,0 - 0,4	Cuirasse de travertin
	0,40 - 1,0	Travertin non induré blanchâtre parfois rougeâtre + sol rouge
	1,0 - 1,6	Travertin non induré plus ou moins argileux et peu effervescent à l'HCL
3	0,0 - 1,1	Sol sableux noirâtre
	1,1 - 1,8	Sol sableux gris foncé
	1,8 - 2,2	Travertin non induré mélangé à quelques débris de quartz
6	0,0 - 0,2	Sol vévétal
	0,2 - 0,6	Cuirasse de travertin
	0,6 - 0,9	Travertin non induré avec quelques concrétions calcaires
	0,9 - 1,6	Calcaire blanchâtre avec des intercalations de roches verdâtres
7	0,0 - 0,3	Sol noirâtre végétal
	0,3 - 1,2	Travertin non induré + sol rouge
	1,2 - 1,7	Calcaire blanhâtre-verdâtre peu effervescent à HCl
8	0,0 - 0,5	Sol noirâtre végétal
	0,5 - 1,4	Concrétions calcaires avec de rares intercalations de roche volcanique
9	0,0 - 0,3	Sol argileux
	0,3 - 0,7	Cuirasse de travertin
	0,7 - 1,0	Travertin non induré mélangé au sol rouge
	1,0 - 1,6	Calcaire jaune-verdâtre
10	0,0 - 0,3	Sol sableux noir
	0,3 - 0,7	Cuirasse de travertin
	0,7 - 1,1	Travertin non induré
	1,1 - 1,6	Calcaire jaune-verdâtre
11	0,0 - 0,3	Sol sableux noir
	0,3 - 0,4	Cuirasse de travertin
	0,4 - 1,1	Travertin non induré mélangé au sol sableux
	1,1 - 1,7	Concrétions calcaires blanc-jaunâtres
12	0,0 - 0,55	Sol végétal
	0,55 - 1,3	Travertin non induré mélangé à un sol sableux
	1,3 - 1,7	Rognons calcaires blanchâtres-verdâtres
13	0,0 - 0,5	Sol végétal
	0,5 - 0,8	Cuirasse de travertin
	0,8 - 1,3	Travertin non induré
	1,3 - 1,8	Calcaire blanchâtre-verdâtre
14	0,0 - 0,4	Sol végétal
	0,4 - 1,1	Travertin non induré avec de rares débris de calcaires blanchâtres
	1,1 - 1,25	Calcaire blanchâtre

1°) Cd\ windows↵
2°) C:\WINDOWS> win↵
3°) Cliquer le souris 2x.
4°) open sur File.
5°) Aller [-Open-] et cliquer 2x sur [-a-].
6°) *XL* => le cliquer < *.wk1 → OK.
7°) [-Open-]
8°) Set print area.
9°) File page setup.
- Header : (del)
- Footer : (del)

10°)

DESCRIPTION DES PUITS - RUGOMBO III.

Puits	Profondeur(m)	Description du puits
15	0,0 - 0,5	Sol végétal
	0,5 - 0,1	Travertin non induré
	0,1 - 1,8	Calcaire blanc-verdâtre
16	0,0 - 0,7	Sol sableux noir
	0,7 - 1,3	Travertin non induré
	1,3 - 1,8	Travertin blanchâtre avec des intercalations d'argile
17	0,0 - 0,2	Sol noir
	0,2 - 0,4	Cuirasse de travertin
	0,4 - 0,8	Travertin non induré
	0,8 - 1,8	Calcaire blanchâtre avec des passées limonitisées
18	0,0 - 0,55	Sol végétal
	0,55 - 0,9	Travertin non induré
	0,9 - 1,5	Calcaire blanc-jaune
19	0,0 - 0,6	Sol végétal
	0,6 - 1,2	Travertin non induré avec de rares concrétions de calcaires
	1,2 - 2	Calcaire blanchâtre avec des intercalations centimétriques d'argile
21	0,0 - 0,5	Cuirasse de travertin
	0,5 - 1,7	Travertin non induré mélangé avec quelques rognons calcaires blanchâtres gris-clairs
	1,7 - 2,5	Rognons calcaires avec des intercalations de marnes
22	0,0 - 0,3	Cuirasse de travertin
	0,3 - 1,1	Travertin non enduré
	0,1 - 1,6	Roche argileuse peu légère avec des intercalations centimétriques de travertin
23	0,0 - 1,2	Sol noirâtre
	1,2 - 1,5	Roches marneuses
	1,5 - 1,8	Craie ?
	1,8 - 2,8	Craie + rognons calcaires avec des passées marneuses
24	0,0 - 0,6	Sol noirâtre-grisâtre
	0,6 - 1,6	Travertin non enduré dans du sol rougeâtre
	1,6 - 2,6	Rognons silico-carbonatés mélangés au sable
25	0,0 - 0,2	Cuirasse de travertin brunâtre
	0,2 - 1,0	Travertin non enduré mélangé au sol
	1,0 - 2,1	Travertin avec des rognons calcaires blanchâtres
26	0,0 - 0,2	Sol sableux noirâtre
	0,2 - 1,2	Travertin non enduré brunâtre dans un sol sableux, au début, on a 10Cm de cuirasse
	1,2 - 2,5	Travertin blanchâtre, mélangé à quelques rognons silico-carbonatés
27	0,0 - 0,5	Sol végétal
	0,5 - 1,5	Travertin non enduré sous forme de blocs, mélangé à un sol sableux rouge
	1,5 - 1,85	Travertin blanchâtre à gris-clair
	1,85 - 1,95	Roche argileuse très légère
	1,95 - 2,25	Travertin blanchâtre gris clair mélangé au sol sableux

DESCRIPTION DES PUITS - RUGOMBO III.

Puits	Profondeur(m)	Description du puits
28	0,0 - 0,8	Sol végétal brunâtre
	0,8 - 2,1	Blocs de travertin non induré mélangé au sol sableux
	2,1 - 2,3	Roche argileuse très légère
	2,3 - 2,4	Travertin gri clair à blanchâtre
29	0,0 - 0,9	Sol végétal
	0,9 - 1,5	Travertin non enduré mélangé avec des débris centimétriques d'opale
	1,5 - 2	Travertin verdâtre-blanchâtre
30	0,0 - 0,25	Cuirasse de travertin
	0,25 - 0,9	Travertin non induré mélangé au sol brunâtre
	0,9 - 1,7	Traveretin blanchâtre
	1,7 - 1,9	Roche verdâtre peu effervescente à HCl
32	0,0 - 1,5	Sol végétal brun-rouge
	1,5 - 2,3	Calcaire verdâtre-blanchâtre mélangé au sol brun-rougeâtre
33	0,0 - 0,8	Sol noir plus ou moins sableux
	0,8 - 1,5	Concrétions de travertin non induré avec quelques galets de quartz
	1,5 - 3,3	Calcaire vert-blanchâtre mélangé avec du sol sableux rouge rougeâtre
34	0,0 - 0,6	Sol végétal noir
	0,6 - 1,3	Travertin non induré dans un sol rouge
	1,3 - 2	Calcaire blanchâtre mélangé au sol rougeâtre
40	0,0 - 0,25	Travertin non induré dans un sol noirâtre à gris foncé
	0,25 - 0,55	Travertin non induré mélangé à un sol brun
41	0,0 - 0,9	Cuirasse de travertin
	0,9 - 1,45	Travertin non induré dans un sol rouge
	0,45 - 1,75	Travertin blannâtre non induré
42	0,0 - 1,4	Travertin non induré mélangé au sol rougeâtre
	1,4 - 1,75	Travertin calcaire blanchâtre à verdâtre
44	0,0 - 1,0	Travertin non induré effervescent à HCl
	1,0 - 1,8	Travertin blanchâtre
45	0,0 - 0,45	Travertin non induré grisâtre mélangé avec du sol noirâtre
	0,45 - 1,05	Travertin non induré rougeâtre mélangé au sol rouge
	1,05 - 1,25	Travertin calcaire mélangé avec galets de quartz et de basalte
46	0,0 - 0,6	Travertin gris-clair dans un sol noirâtre
	0,6 - 1,3	Travertin non induré grisâtre mélangé au sol rouge
	1,3 - 1,8	Travertin peu effervescent à HCl mélangé avec quelques galets de basalte
47	0,0 - 0,7	Cuirasse de travertin
	0,7 - 1,1	Travertin non induré dans un sol rouge
48	0,0 - 0,05	Sol arable noirâtre

DESCRIPTION DES PUITS - RUGOMBO III.

Puits	Profondeur(m)	Description du puits
50	0,0 - 0,2	Sol noir
	0,2 - 0,9	Cuirasse de travertin
	0,9 - 1,25	Travertin non enduré dans un sol rouge
	1,25 - 1,5	Travertin blanchâtre dans un sol rouge
51	0,0 - 0,9	Travertin non enduré dans un sol rouge
	0,9 - 1,3	Travertin calcaire blanchâtre
52	0,0 - 1,05	Sol brunâtre
	1,05 - 1,85	Travertin non enduré sous forme de rognons melangés au sol brun-rougeâtre
53	0,0 - 1,05	Sol brun-rouge
	1,05 - 1,85	Travertin non enduré rougeâtre mélangé au sol de couleur rouge
	1,85 - 2,1	Rognons calcaires blanchâtres
54	0,0 - 0,5	Cuirasse de travertin
	0,5 - 1,0	Travertin non enduré rouge-blanchâtre dans un sol rouge
	1,0 - 1,75	Travertin non enduré blanchâtre dans un sol rouge-brunâtre
56	0,0 - 0,25	Sol végétal
	0,25 - 1,2	Travertin non enduré dans un sol rouge
	1,2 - 1,5	Travertin blanchâtre-verdâtre
57	0,0 - 1,4	Sol végétal rougeâtre
	1,4 - 2,1	Rognons calcaires dans un sol rouge
58	0,0 - 0,7	Sol grisâtre-noirâtre
	0,7 - 1,6	Travertin non enduré dans un sol rouge
	1,6 - 2,0	Rgnons calcaires
59	0,0 - 0,8	Sol végétal
	0,8 - 1,16	Travertin non enduré blanchâtre-verdâtre dans un sol brun
60	0,0 - 0,45	Roche siliceuse(Opale)
61	0,0 - 0,5	Sol végétal
	0,5 - 0,9	Travertin non enduré dans un sol rouge
	0,9 - 1,4	Travertin blanchâtre
62	0,0 - 0,1	Sol végétal noir
	0,1 - 0,45	Cuirasse de travertin
	0,45 - 1,35	Travertin non enduré rouge-brunâtre dans un sol sableux
	1,35 - 1,65	Rognons calcaires sableux
63	0,0 - 0,8	Sol sableux brun-rouge
	0,8 - 1,8	Travertin non enduré gris clair sous forme de petits blocs dans un sol rouge-brunâtre
	1,8 - 2,0	Travertin blanchâtre
64	0,0 - 0,65	Sol rouge
	0,65 - 1,35	Travertin non enduré blanc-rouge dans un sol sableux
	1,35 - 1,62	Travertin blanchâtre-verdâtre peu effervescent à HCl

DESCRIPTION DES PUITS - RUGOMBO III.

Puits	Profondeur(m)	Description du puits
P244	0,0 - 0,15	Sol végétal noir
	0,15 - 0,60	Blocs de travertin durs, d'aspects bréchiques, dans un sol noir
	0,60 - 1,40	Travertin non induré brun + quelques rognons calcaires blancs
	1,40 - 1,80	Rognons calcaires blanc-jaunâtres, friables + sol brun
	1,80 - 2,00	Roche carbonatée jaune friable
P245	0,0 - 0,25	Sol végétal brun sombre
	0,25 - 1,30	Sol brun
	1,30 - 2,25	Rognons calcaires blancs dans un sol brun(prédominance du sol)
P246	0,0 - 0,70	Sol végétal brun sombre
	0,70 - 1,35	Travertin non induré brun + quelques rognons durs, gris clairs dans un sol brun
	1,35 - 2,10	Rognons calcaires jaunâtres, friables, dans un sol brun
	2,10	Débris de schistes gris + quelques rognons décimétriques
P247	0,0 - 0,70	Blocs de travertin d'aspects bréchiques, gris, blancs, parfois brunâtres
	0,70 - 1,50	Rognons calcaires grisâtres, jaunâtres, renfermant des inclusions de quartz + sol brun
	1,50 - 1,70	Sable dans une roche altérée argileuse verdâtre
P248	0,0 - 0,30	Sol végétal brun sombre
	0,30 - 1,80	Sol brun sombre
	0,80 - 1,50	Travertin non induré + quelques rognons dans un sol brun-rougeâtre
	1,50 - 2,00	Rognons calcaires, gréseux, gris, jaunâtres, dans un sol brun
P249	0,0 - 0,30	Sol brun sombre
	0,30 - 0,80	Sol brun
	0,80 - 1,35	Blocs de travertin dans un sol brun
	1,35 - 2,00	Rognons calcaires blanc-jaunâtres, dans un sol brun
	2,00 - 2,50	Sol brun mélangé avec quelques rognons
P250	0,0 - 0,35	Blocs de travertin gris dans un sol végétal noir
	0,35 - 1,35	Travertin non induré brun + quelques rognons calcaires dans un sol brun
	1,35 - 1,75	Argile gris-verdâtre + quelques rognons calcaires dans un sol brun
P251	0,0 - 0,60	Sol végétal brun sombre
	0,60 - 0,75	Sol sableux brun
	0,75 - 1,95	Travertin non induré blanc dans un sol brun
	1,95 - 2,40	Galets gréso-carbonatés gris + débris de schistes argileux gris + sol brun
P252	0,0 - 0,30	Sol végétal brun sombre
	0,30 - 0,97	Sol rougeâtre
	0,97 - 1,80	Travertin non induré + quelques rognons de travertin jaunâtres, parfois gris, dans un sol rougeâtre
	1,80 - 2,30	Roche gréso-argileuse gris-claire, parfois friable
P253	0,0 - 0,25	Sol végétal noirâtre
	0,25 - 1,45	Sol rougeâtre
	1,45 - 1,90	Roche gréseuse essentiellement carbonatée, grise, jaunâtre dans un sol rougeâtre
P254	0,0 - 0,30	Sol brun sombre
	0,30 - 1,15	Sol rougeâtre
	1,15 - 1,75	Rognons calcaires, jaunâtres, dans un sol rougeâtre
	1,75 - 2,05	Rognons gréso-carbonatés gris, parfois jaunâtres, mélangés de quelques débris de schistes gris dans un sol brun-rougeâtre

ANNEXE I.2. OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTION DES PROFILS DANS LA REGION DE L'IMBO-CENTRE.

I.2.1. Obsevations de terrain.

1: Profil localisé à 150m avant le km 15, à gauche de la Route Nationale n°5 (RN.5) (Bujumbura - Cibitoke), dans une plage déprimée, périodiquement inondée, à drainage superficiel entravé. (Le puits RN.5). (Cfr diapositive n°4).

- Sol noir, argileux; mouillé, il est très plastique, tandis que, à sec, il résiste fortement à la tarrière.
- Les fentes de dessication, très larges, dessinent des structures polyédriques dans l'horizon C. La structure est anguleuse et grossière. Elle se présente sous forme d'agrégats à faces striées (strickensides). Sa profondeur est non précisée.

2: Sur les rives du cours de la rivière Ninga, même type de sol mais avec des caractères vertiques plus prononcés (slickensides, fentes de dessication, miroirs de glissement). (Cfr diapositive n°5).

- Variation latérale de "faciès" visible par la coloration, avec localement présence de niveaux "lenticulaires" de sables fins et silts interstratifiés.
- Aspect "stratifié" du sol noir qui passe vers le haut à un silt gris et fortement micacé (paillettes de muscovites détritiques); présence de sable grossier (1 à 5Cm de diamètre) vers la surface. L'argile noire se termine en "biseau" (problème d'estimation d'épaisseur).

3a Dans la plage entre le "Village 3" (V_3) et le cours d'eau de la Ninga: argile noire avec des fentes de dessication assez larges (1 à 3Cm). On observe les mêmes traits pédologiques des vertisols décrits aux points précédents. (Correction sur la carte pédologique ---> plage antérieurement cartographiée comme un "solonetz").

- Niveau très sableux bien classé (cfr éch.).
- Mauvais drainage (dans les rizières).
- Fissuration du pont sur la rivière Ninga et des constructions dans le paysannat de Gihanga (suite aux fentes de dessication).





3b Présence de concrétions carbonatées et de taches de rouille (mottling) dans les horizons de l'argile noire.
- Présence de paillettes de micas (muscovites) détritiques fines sur des passées limoneuses et silteuses intercalées dans les argiles noires (cfr diapositive n°6).

3c Mêmes observations que précédemment (point 3b) avec des concrétions carbonatées dans un horizon surmonté par le niveau d'argile noire à larges fentes de dessication; nette distinction de trois horizons: niveaux inférieur et supérieur, constitués par de l'argile noire, et niveau intercalaire, très riche en conrétions carbonatées, constitué par une argile jaune-ocre.

4: Contact entre vertisol et solonetz (le cours d'eau de la Kajeke).
- Sur la rive gauche, développement des "colonnes" très dures dans l'horizon B du solonetz; l'horizon A se différencie nettement en deux sous-horizons A_1 et A_2.
- Sur la rive droite, "vertisol" se présentant sous un aspect stratifié (niveaux sableux à silteux interstratifiés dans l'argile noire). (Cfr éch. et diapositive n° 7); micro-stratifications bien apparentes dessinant de belles structures laminaires.

5: Argile noire au-dessus d'une argile plus ou moins jaunâtre à concrétions carbonatées, le long des rives de la Kajeke (aspect stratifié bien visible).

6: Sur le flanc de la Murama: matériaux gnessiques (très riches en biotite et muscovite) en voie d'altération (à côté du château d'eau). Observation sur des blocs non en place mais résultant du démantèlement des roches du même sommet.

7: "Travertins" de Gihungwe exploités pour le four à chaux situé en contre-bas de Murama.

8: Unité d'un type de sol (non vertisolique) non cartographiée sur la carte pédologique de la S.R.D Imbo, d'extension faible, intercalée dans une grande plage de vertisol.

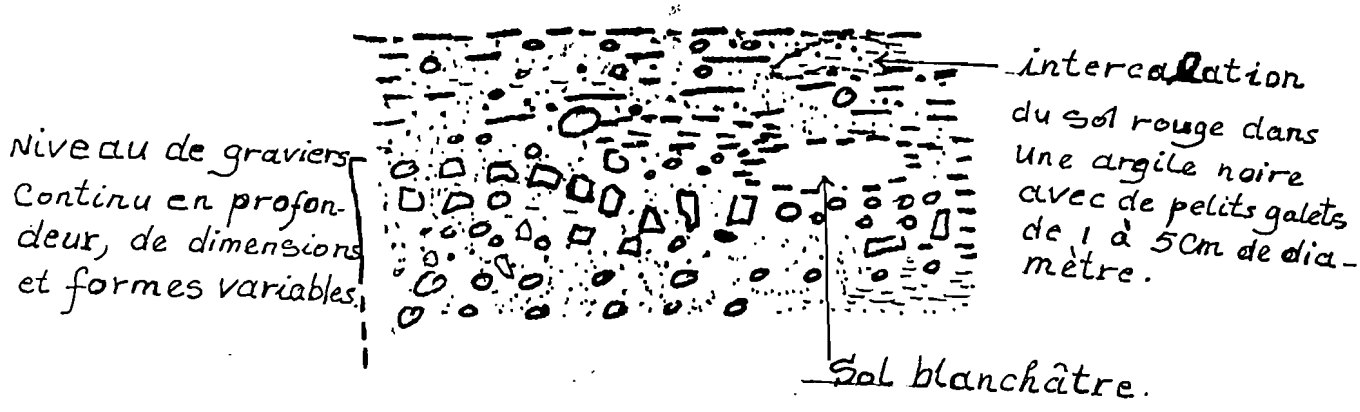
9: Profil situé à 200m du PK 18.2 (sur la RN.5). Mêmes observations faites au point (1), avec présence de sables fins dans l'argile noire.
Les miroirs de glissement, avec un aspect fortement luisant de la surface, sont bien observables, faisant un angle (± 5°) avec le plan horizontal.

10 : Sur la colline de Kibangu, dans le bassin versant de la plaine de l'Imbo-Centre: nombreux affleurements de gneiss, très riches en minéraux foncés (cfr. éch.) et de métaquartzites feldspathiques et micacés (roches fortement métamorphiques et foliées). Mêmes types de roches que celles de la colline Murama (point 6) du même bassin versant.

11 : A côté de la rive gauche du cours d'eau de la Kidwebezi: argile noire, très légèrement micacée, avec une faible quantitée de sables.
L'horizon supérieur contient des radicelles en quantité abondante.
Argile très plastique à l'état mouillé.
(Echantillon prélevé environ de 1m à 1.40m de profondeur); correction du contour de la plage sur la carte pédologique.

12 Sur la rive gauche de la Muzibazi: - succession de niveaux bien stratifiés de galets de roches métamorphiques, foliées et d'argile noire, avec des intercalations lenticulaires d'un sol rouge graveleux et d'un autre sol plus ou moins blanchâtre. (Bonne illustration de l'aspect stratifié et lenticulaire).

En coupe :



- Présence de beaucoup de paillettes de mica dans les différentes strates.
Le sol exploité pour la briqueterie à peu près à 20m de la rive du cours d'eau, donne des briques sans craquelures même à sec (pas de caractère vertique); correction du contour de la plage

d'argile noire (jusqu'à plus ou moins 5m de la rive).

13 Plage de vertisol; la couleur noire d'une argile très plastique, avec localement un mauvais drainage et une odeur typique des terres, sont des critères caractéristiques des vertisols. Présence de sables fins, en faible quantité, avec beaucoup de radicelles dans l'horizon supérieur. Dans la boue provenant des horizons inférieurs (de profondeur), présence de multiples fentes de dessication (très serrées); plage de vertisol qui n'avait pas encore été cartographiée.

14: Sur le côté gauche de la route Bujumbura - Bubanza, dans l'horizon supérieur de la plage vertisolique, présence de galets de quartz (bien roulés), de dimensions variables (1 - 5Cm à peu près).

15: Dans un trou profond (3 - 4m), nette distinction de deux horizons:
- horizon supérieur (A) (moins d'un mètre d' épaisseur), très noir, lardé de nombreuses fentes de dessication.
- horizon inférieur (C): il va jusqu'à une profondeur qui dépasse 4m. Présence de nombreuses concrétions carbonatées tout le long du profil.

I.2.2. Description des profils.

Puits RN.5

Localisation: dans une dépression, aux abords de la RN. 5 (Bujumbura - Cibitoke), sur le côté Ouest de la route

Echantillonnage: dix-neuf échantillons ont été collectés sur une profondeur de 3.30m, à une maille de 20Cm.

Puits NINGA et NYESHANGA:

Localisation: dans une zone marécageuse, à l'Est de la RN.5 , à proximité de la rivière Ninga.

IMBO CENTRE

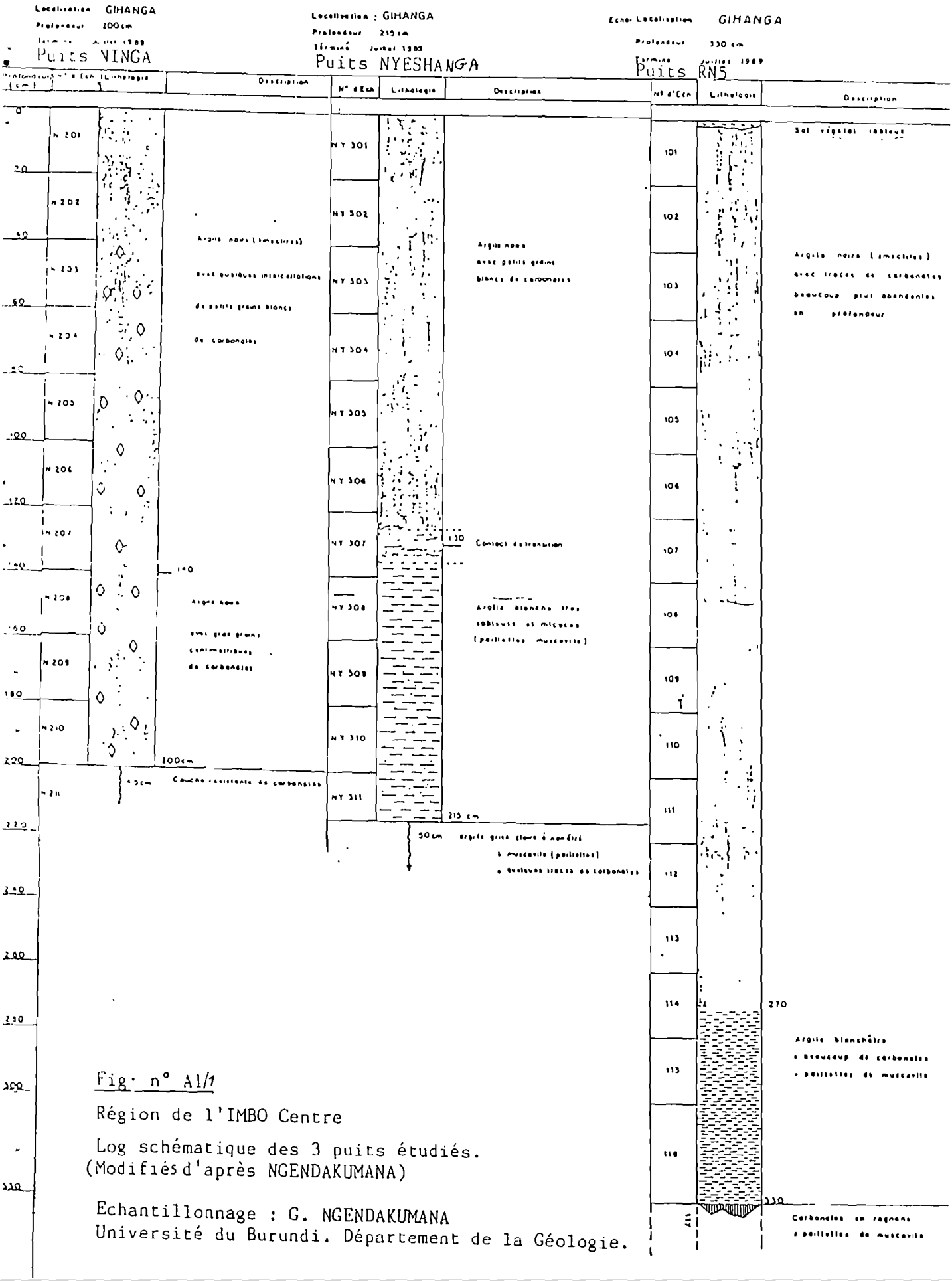


Fig. n° A1/1

Région de l'IMBO Centre

Log schématique des 3 puits étudiés.
(Modifiés d'après NGENDAKUMANA)

Echantillonnage : G. NGENDAKUMANA
Université du Burundi. Département de la Géologie.

Echantillonnage: Onze échantillons ont été collectés dans des puits de 2,00m à 2,15m de profondeur, à une maille de 20Cm.

II. Description des horizons.

0 - 13Cm: R 172 — Ch YR 3/1; frais; argile limoneuse; structure grumeleuse fine et moyenne très bien développée, stable; mottling diffus; radicelles denses; transition abrupte et régulière; mince pellicule de cendres.

13 - 24Cm: R 173 — Argile, grains de sable luisants subanguleux à subarrondis, souvent lavés et disposés le long des plans de clivage des unités structurales; compact; frais; fentes de retrait en voie de rétrécissement; structure moyenne et grossière polyédrique anguleuse en "coins"; rares slickensides; revêtements nets; mottling net; quelques plages ocre-rouge (5 YR 4/6) non indurées; radicelles nombreuses; transition distincte et régulière.

24 - 60Cm: R 174 — Ch 10 YR 3/3 - 3/2 ; argile lourde, très légèrement micacée; grains de sable rares; compact; légèrement frais; fentes de retrait (2 -3Cm); slickensides nombreux; structure en "coins" grossière; mottling intense en petites taches nombreuses et plages diffuses; la rouille imprègne la majorité des canaux radiculaires; radicelles encore nombreuses; transition graduelle et régulière.

60 -100Cm: R 175 — Ch 10 YR 3/3; argile lourde, très légèrement micacée; rares sables lavés ou non; frais; compact; fentes de retrait (2 - 3Cm) nombreuses; slickensides très nombreux; structure en "coins" très grossière, très bien développée; le mottling paraît plus intense que dans l'horizon sus-jacent; certaines radicelles sont vraiment enrobées dans une gangue ferrugineuse; radicelles encore assez nombreuses; transition graduelle et régulière.

100-140Cm R 176 — Ch 10 YR 3/3 - 3/4; argile lourde; fentes de retrait étroites; slickensides moins nombreux; structure en "coins" très bien développée; mottling nettement plus intense; radicelles encore présentes.

Sonde

140-190Cm R177 — Ch 10 YR 3/4 - 3/3; argile lourde, fine, micacée, légèrement limoneuse, fortement envahie par le mottling.

190-240Cm R 178	Ch idem; argile lourde, fine, limoneuse, plastique, traces de gleyfication; petites concrétions noirâtres.
240-290Cm R 179	Ch 10 YR 3/4 - 4/4; argile lourde, limoneuse, micacée; gleyfiée.

Profil n°19.

Vo - vertisol hydromorphe, argileux lourd, noir, intergrade sol salin.

I. Localisation: Basse-Rusizi, plaine lacustre, transversale 10, le long de la Ninga, zone à micro-relief gilgaï, profil prélevé dans l'ados. Plaine herbeuse.

II.Description des horizons:

0 - 4Cm: R 221 — Ch 25 Y 2/0; argile lourde fine; frais; structure granulaire grossière très bien développée, très stable; radicelles très nombreuses; transition abrupte et régulière.

4 - 14Cm: R 222 — Ch 25 Y 2/0; argile lourde fine; larges prismes se détruisant en polyèdres grossiers anguleux; pas de slickensides; les unités structurales sont parcourues de petits canaux radiculaires; radicelles très nombreuses; transition graduelle et régulière.

14 - 37Cm R 223 — Ch 25 Y 2/0; argile lourde, fine; compacte; sec, fentes de retrait semblables à celles de l'horizon précédent; concrétions de Ca très nombreuses (de diamètre variant entre 1mm à 1Cm) à pellicules blancs-gris très résistantes; slickensides typiques rares; structure en coins très bien développée; radicelles encore nombreuses; transition graduelle et régulière.

37 - 76Cm R 224 — Ch et texture identique à l'horizon précédent; slickensides très nombreux; structure grossière en coin; concrétions de Ca toujours présentes mais densité nettement plus faible, dimension plus grande; radicelles encore nombreuses; transition graduelle et régulière.

76 - 117Cm: R 225 — Horizon identique au précédent mais concrétions de Ca excessivement rares, quelques taches 10 YR 7/2 pulvérulentes; slickensides très nombreux.

117 - 140Cm: R 226 — Ch 10 YR 3/1; argile lourde, fine;compacte, légèrement plastique; slickensides légèrement très nombreux; fentes de retrait moins nettes; structure en coin; rares petites concrétions de Ca; radicelles peu nombreuses.

140 - 165Cm: — Horizon de transition.

165 - 180Cm: R 227 — Ch 10 YR 5/1 argile lourde limoneuse à laquelle se mêlent quelques petites concrétions de Ca.

180 - 205Cm: R 228 — Idem; concrétions de Ca très résistantes, elles semblent former une croûte au plancher de l'horizon.

ments; petites concrétions noirâtres (1 - 3mm); dans le fond de l'horizon, le chroma tend vers 5 YR 4/6); radicelles rares.
Prélevement à la sonde.

140- 190Cm: Idem mais couleur 3.75 YR 3/6 + taches sombres.
R 285

190- 240Cm: Idem mais couleur 5 YR 4/6 + taches sombres.

240Cm Socle imperméable.

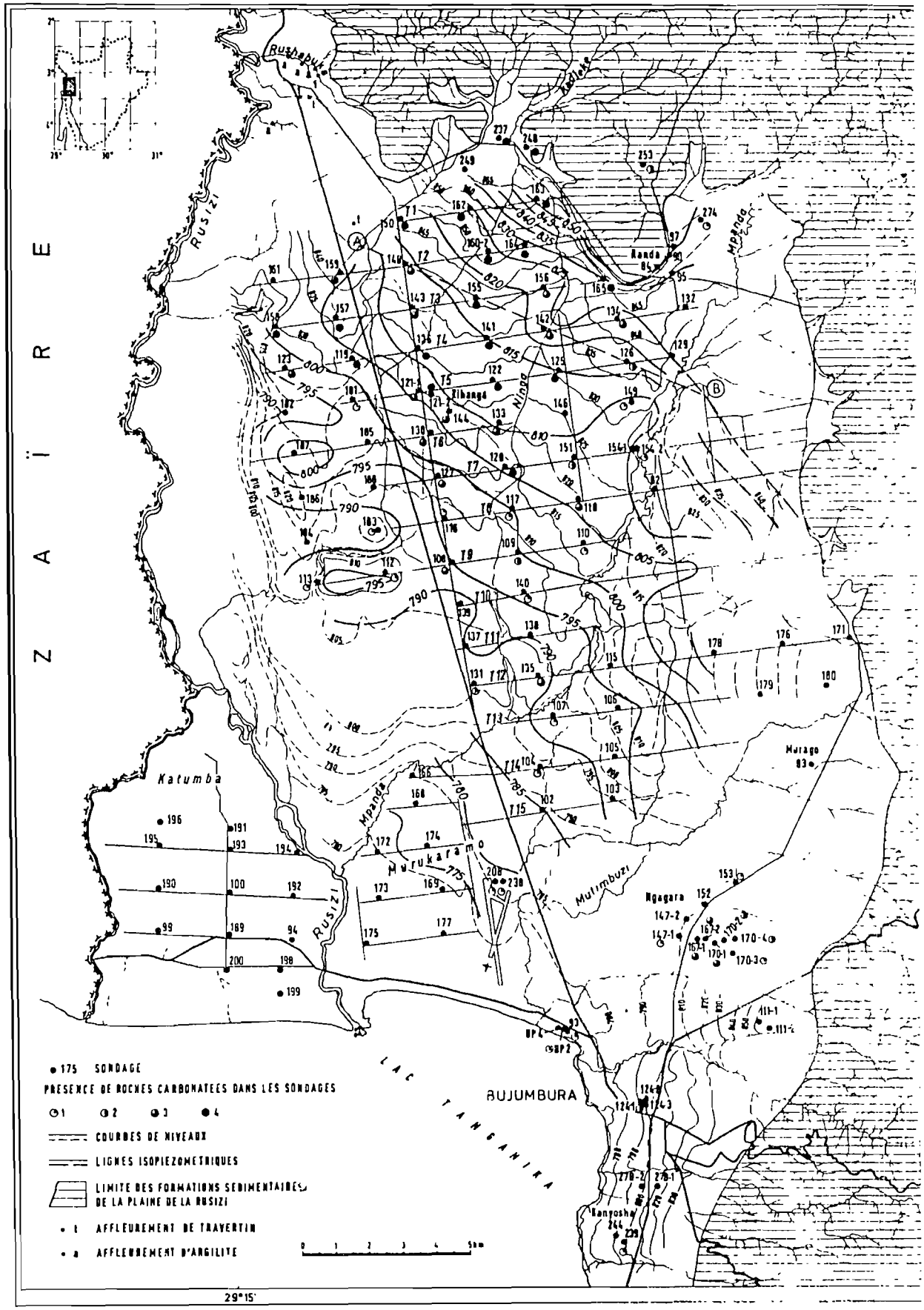


Fig. Plaine de la Basse Rusizi. Situation des sondages - Lignes isopiézométriques.
1. Présence de roches carbonatées dans 1 à 25% des terrains traversés; 2. Présence de roches carbonatées dans 25 à 50% des terrains trav
3. Présence de roches carbonatées dans 50 à 75% des terrains traversés; 4. Présence de roches carbonatées dans 75 à 100% des terrains trav

(A. Waleffe 1985)

ANNEXE I -2-3.

Données relatives aux sondages

N°	Date d'exécution	Localisation	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Terrains traversés
82	10-11.55	Transv. 8	6	27,50	12,67	-	-	12,50	4	0,74	argile-sable graveleux
83	10-12.55	Murago	6	20,50	3,58	6,72	-	2,40	4	14,0	argile-sable-galets
84	12 55-1 56	Randa	6	34,50	25,0	-	-	24,9	0,15	0,04	argile-sable-soubassement granitique
92	12 55-1 56	Randa	6	31,50	22,70	-	-	22,70	4		argile-sable-soubassement granitique
93	2-5 56	Buja-Regideso	12	77,10	2,05	6,90	-	-	-	-	sable-argile-sable, concr. calc.
UP2	7-11 56	Buja-Regideso	-	93,50	-	-	-	0,79	50	2,91	sable, gravier, argile
UP4	7 11 56	Buja-Regideso	-	82,50	-	-	-	1,00	94	5,89	sable, gravier, argile
94	4 5.56	Karumba	6	38,50	6,10	32,50	-	3,12	4	0,06	sable
96	1 56	Randa	6	23,00	13,05	-	-	13,05	4	1,93	argile, sable, gravier
97	1-2 56	Randa	6	22,50	17,80	-	-	14,25	4	0,18	argile, sable, gravier
99	6-7 56	Karumba	6	32,00	4,50	11,00	-	1,96	4	∞	sable
100	11-12 56	Karumba	6	32,50	9,00	12,00	-	3,47	4	∞	sable
102	7-8 53	Transv. 15	6	22,23	1,98	18,70	-	4,64	5,2	1,56	sable, argile
103	8 53	Transv. 15	6	26,06	6,00	21,00	-	2,11	4	1,22	sable, argile
104	8-9 53	Transv. 14	6	48,66	24,80	38,80	-	6,24	4	2,41	sable, argile, concr. calc.
105	8 9 53	Transv. 14	6	36,50	19,40	28,00	-	9,33	4	3,96	sable, argile, gravier
106	9-10 53	Transv 13	6	25,50	16,30	21,00	-	13,40	4	11,10	sable, argile
107	10-11 53	Transv. 13	6	32,00	21,00	-	-	7,53	4	9,25	sable, argile, concr. calc.
108	9 53	Transv 9	6	25,45	17,17	-	-	12,70	4	0,79	argile, sable, gravier, concr. calc.
109	12 53-2 54	Transv 9	6	75,95	11,50	74,20		9,00	4	0,16	argile, sable, argile calc.
110	2-3 54	Transv. 9	6	29,09	18,00	22,15	-	14,00	4	2,16	sable, argile, argile calc.
111-1	11 53	Buja-Ecole Prof.	6	48,00	-	-	-	-	-	-	argile, sable, cailloutis (pas d'eau)
111-2	11 53	Buja-Ecole Prof.	6	25,70	-	-	-	-	-	-	argile, sable, cailloutis (pas d'eau)
112	9-11.53	Transv. 9	6	74,15	29,00	38,00	-	19,20	4	0,18	argile, sable, concr calc
113	12 53	Transv. 9	6	33,15	26,05	-	-	11,41	4	1,85	sable, sable argileux, concr. calc.
115	12 53	Transv 12	6	21,40	14,40	-	-	11,80	4	9,25	argile, sable argileux
116	11 53	Transv 8	6	23,45	15,50	-	-	13,34	4	0,28	argile, sable argileux, concr. calc.
117	12.53	Transv. 8	6	29,00	13,00	-	-	11,40	4	2,77	argile, sable, argile calc., concr. calc.
118	3 54	Transv. 8	6	22,20	18,00	-	-	14,70	4	2,22	argile, sable, argile calc
119	5-6.54	Transv. 4	6	38,66	30,00	-	-	25,50	4	2,22	argile, sable argileux, argile calc.
121 1	12 53 1.54	Transv. 5	6	53,10	19,15	51,40	-	22,23	4	0,16	argile, sable argileux, argile et concr. calc.
121 2	1-3 54	Transv. 5	6	24,40	19,30	-	-	15,34	4	27,75	argile, sable, argile et concr. calc
122	2-3 54	Transv. 5	6	25,10	22,50	-	-	16,62	4	3,70	argile, argile sableuse, argile et concr. calc.
123	6 7 54	Transv. 4	6	49,45	33,00	-	-	30,00	4	6,16	argile, sable, argile et sable calc.
124 1	12 53-1 54	Bujumbura	6	30,70	9,00	24,00	-	7,60	5,2	2,48	argile sableuse, sable, concr. calc.
124-2	2 54	Bujumbura	12	39,00	17,50	25,00	36,00	14,40	17	0,36	argile, argile sableuse, sable, concr. calc.
124-3	5-9 60	Bujumbura	6	80,00	31,00	61,00	71,00	8,46	22	2,93	sable, argile, gravier
125	3 54	Transv. 5	6	21,40	21,00	-	-	16,50	4	7,40	argile, argile sableuse, argile calc.
126	3 54	Transv. 5	6	29,00	28,00	-	-	20,30	4	0,79	argile, argile sableuse, sable, concr calc
127	3 54	Transv. 7	6	38,20	25,10	-	-	16,10	4	0,91	argile, sable argileux, argile calc. et concr. calc
128	4 54	Transv. 7	6	19,20	15,20	-	-	9,20	4	∞	argile, sable, argile calc
129	4 54	Transv. 5	6	20,85	3,20	15,00	-	8,96	4	7,41	argile, sable, gravier
130	4.54	Transv. 6	6	34,80	18,30	-	-	14,40	4	1,85	argile, sable argileux, argile et concr calc.
131	4 54	Transv. 12	6	55,00	15,00	30,00	-	12,50	4	0,27	argile, sable, concr. calc
132	4 54	Transv. 4	6	14,37	8,10	-	-	5,63	4	2,58	argile, sable, gravier
133	4-5 54	Transv. 6	6	20,00	15,00	-	-	11,35	4	1,30	argile, sable, argile et concr. calc
134	5.54	Transv. 4	6	32,00	27,00	-	-	19,80	4	27,75	argile, sable argileux, argile calc
135	5 54	Transv. 12	6	29,34	19,00	-	-	14,80	4	0,96	argile, argile sableuse, argile calc.

(1) Diamètre du sondage (en pouces)
(2) Profondeur du sondage (en mètres)
(3) Profondeur à laquelle la 1ère nappe a été atteinte (en mètres)
(4) Profondeur à laquelle la 2ème nappe a été atteinte (en mètres)
(5) Profondeur à laquelle la 3ème nappe a été atteinte (en mètres)
(6) Profondeur de la nappe au repos à l'achèvement du sondage (en mètres)
(7) Débit maximum atteint au cours des essais de pompage (en m³/heure)
(8) Débit spécifique calculé au débit (7) (en litres/seconde, mètre)

N°	Date d'exécution	Localisation	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Terrains traversés
136	5.54	Transv. 4	6	35,68	24,00	-	-	17,50	4	3,17	argile, sable, argile calc.
137	5-6.54	Transv. 11	6	31,70	14,00	-	-	13,39	4	0,76	sable, argile
138	6.54	Transv. 11	6	36,50	16,00	-	-	16,00	4	1,46	sable, argile
139	7.54	Transv. 10	6	35,65	18,00	-	-	17,66	4	1,46	argile sableuse, sable
140	6-7.54	Transv. 10	6	31,75	11,60	-	-	11,36	4	1,68	sable argileux, argile, concr. calc.
141	5-6.54	Transv. 4	6	31,00	24,00	-	-	20,10	4	5,45	argile, argile sableux, sable, argile et concr. calc.
142	6.54	Transv. 4	6	21,00	19,00	-	-	10,34	4	10,10	argile sableuse, sable, argile et concr. calc.
143	6-7.54	Transv. 3	6	38,27	11,00	30,00	-	22,13	4	15,85	sable argileux, sable, concr. calc.
144	7.54	Kihonga	6	41,33	23,00	-	-	17,00	4	∞	argile, sable argileux, sable parfois calc.
146	7.54	Transv. 6	6	29,52	25,00	-	-	13,50	4	12,33	argile, sable, gravier
147-1	7.54	Ngagara	6	26,50	14,00	-	-	13,00	4	2,05	sable argileux, sable, gravier, sable calc.
147-2	8.54	Ngagara	6	28,78	11,00	-	-	10,56	4	6,53	argile, sable, gravier
148	7-8.54	Transv. 2	6	36,00	34,00	-	-	25,44	4	15,85	argile, sable, gravier, argile et concr. calc.
149	7-8.54	Transv. 6	6	38,75	29,00	-	-	23,35	4	37,00	argile, sable, gravier, argile calc.
150	8.54	Transv. 1	6	38,00	34,40	-	-	29,16	4	3,17	argile, sable, gravier, gravier calc.
151	8.54	Transv. 7	6	37,50	25,00	-	-	16,00	4	2,26	argile, sable, gravier, argile calc.
152	8.54	Ngagara	6	27,00	14,00	-	-	11,20	4	1,11	argile, sable, gravier
153	8-9.54	Ngagara	6	28,50	14,00	19,00	-	14,60	4	0,37	sable, argile, gravier
154-1	8-9.54	Transv. 7	6	17,20	17,00	-	-	16,85	-	-	argile, sable, gravier
154-2	9.54	Transv. 7	6	39,10	19,00	35,00	-	14,77	4	1,52	argile, sable, gravier, argile calc.
155	8-9.54	Transv. 3	6	39,95	29,10	-	-	26,30	4	3,96	argile, sable, gravier, argile et sable calc.
156	9-10.54	Transv. 3	6	41,00	18,00	30,00	-	17,35	4	0,57	argile, sable, gravier, argile et sable calc.
157	9-10.54	Transv. 3	6	46,00	36,07	-	-	30,05	4	0,85	argile, sable, gravier, argile et sable calc.
158	9-10.54	Transv. 3	6	37,00	33,00	-	-	26,39	4	1,01	argile sableuse, argile, sable, argile calc.
159	10.54	Transv. 2	6	52,65	38,00	-	-	37,80	4	0,61	argile, sable, sable graveleux, parfois calc.
160-2	10-11.54	Transv. 2	6	38,50	35,00	-	-	27,35	4	0,32	argile, sable, sable graveleux, argile et concr. calc.
161	10 11.54	Transv. 2	6	76,00	31,00	53,00	-	25,27	4	0,98	argile, sable, gravier, argilite à 53 m
162	11.54	Transv. 1	6	48,75	45,60	-	-	31,00	4	4,27	argile, gravier, sable graveleux, argile calc.
163	11.54	Transv. 1	6	29,00	17,00	-	-	10,00	4	3,96	argile sableuse, sable, gravier, argile calc.
164	11-12.54	Transv. 2	6	31,50	30,20	-	-	18,40	4	13,87	argile sableuse, sable, gravier, argile calc.
165	12.54	Transv. 3	6	31,80	28,30	-	-	17,70	4	5,04	argile sableuse, sable, gravier, concr. calc., soubassement à 31 m
166	12.54	Murukaramo	6	14,80	12,00	-	-	7,81	4	12,33	argile, sable, sable graveleux
167-1	12.54-1.55	Ngagara	6	23,60	13,20	-	-	11,20	4	27,75	argile, sable, gravier, argile calc.
167-2	1.55	Ngagara	6	25,50	19,20	-	-	15,30	4	2,46	argile, sable, gravier, argile calc.
168	12.54-1.55	Murukaramo	6	26,00	13,00	-	-	7,50	4	4,62	argile, sable
169	2.55	Murukaramo	6	29,33	6,00	15,00	-	8,09	4	27,75	argile, sable
170-1	1.55	Ngagara	6	26,25	22,00	-	-	14,40	4	5,45	argile sableuse, gravier, sable, argile calc.
170-2	1.55	Ngagara	6	45,30	17,60	21,30	-	16,08	4	27,75	argile, sable, gravier, argile calc.
170-3	1-3.55	Ngagara	6	49,00	20,00	30,00	-	17,56	4	2,64	argile, sable, gravier, argile et concr. calc.
170-4	3-4.55	Ngagara	6	25,50	21,00	-	-	13,42	4	5,29	argile, sable, gravier, argile et concr. calc.
171	2-4.55	Transv. 12	6	42,50	18,00	26,00	-	22,20	4	3,47	argile, sable, gravier, argilite
172	1-2.55	Murukaramo	6	32,00	8,00	14,00	-	7,32	4	1,58	argile, sable
173	3.55	Murukaramo	6	21,00	8,00	-	-	1,50	4	18,50	argile, sable
174	2.55	Murukaramo	6	23,87	12,00	-	-	5,00	4	12,33	argile sableuse, sable
175	3.55	Murukaramo	6	18,00	7,00	-	-	3,64	4	27,75	argile, sable
176	3-4.55	Transv. 12	6	21,00	15,00	-	-	8,05	4	4,11	argile, sable graveleux
177	3.55	Murukaramo	6	20,92	4,00	5,50	-	4,47	4	6,17	sable, argile
178	4.55	Transv. 12	6	20,00	11,35	-	-	8,00	4	3,58	argile, sable graveleux
179	4-5.55	Transv. 13	6	26,50	9,25	-	-	3,47	4	12,33	argile, sable, gravier
180	4.55	Transv. 13	6	26,50	11,30	-	-	8,00	4	6,93	argile, sable, gravier
181	1-2.56	Transv. 5	6	44,00	32,00	39,00	-	22,00	4	0,74	argile, sable, concr. calc.
182	2-3.56	Transv. 5	6	48,00	33,50	-	-	31,71	4	2,13	argile, sable
183	2-3.56	Transv. 8	6	39,50	21,50	34,00	-	25,10	4	1,46	argile, sable, sable graveleux, concr. calc.
184	3-4.56	Transv. 6	6	47,50	24,55	40,00	-	27,00	4	0,83	sable, argile, gravier
185	3-4.56	Transv. 6	6	45,50	24,00	-	-	20,06	4	9,25	sable, argile
186	4-5.56	Transv. 7	6	52,50	28,00	-	-	25,95	4	6,93	sable, argile, sable graveleux
187	5-6.56	Transv. 6	6	36,00	32,50	-	-	14,90	4	3,82	argile, sable
188	6.56	Transv. 7	6	26,50	23,00	-	-	18,11	4	7,40	argile, sable

N	Date d'exécution	Localisation	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Terrains traversés
189	5-6-56	Katumba	6	56,60	6,50	15,50	-	4,03	5	∞00	sable, gravier
192	7-56	Katumba	6	24,00	5,00	-	-	1,92	4	18,50	sable, argile
191	7-8-56	Katumba	6	48,00	5,50	12,50	15,50	3,68	4	∞	argile, sable
192	7-8-56	Katumba	6	43,00	4,00	16,50	-	3,25	4	1,38	sable, argile, sableuse
193	8-9-56	Katumba	6	49,00	5,50	11,00	41,00	3,54	4	∞	sable, argile
194	8-10-56	Katumba	6	56,00	6,00	-	-	3,25	4	∞	argile, sable
195	9-56	Katumba	6	26,00	5,00	-	-	2,36	4	∞	argile, sable
196	9-56	Katumba	6	18,00	5,00	-	-	2,22	4	00	argile, sable, gravier
198	10-11-56	Katumba	12	15,00	4,50	-	-	1,66	24	7,23	sable, argile sableuse
199	10-11-56	Katumba	12	16,00	4,50	-	-	1,35	24	7,74	sable, argile sableuse
200	11-56	Katumba	12	20,00	6,00	-	-	2,17	15	1,46	argile, sable
226	11-56-4.57	Aerodrome	6	55,50	8,00	14,00	26,00	6,45	24	1,24	sable micacé, argile sableuse, travertin à 27 m
237	9-58	Kadjeke	6	8,00	-	-	-	-	-	-	latérite, gravier, granite, concr. calc.
238	5-9-58	Aerodrome	12,6	65,00	15,00	25,00	57,00	6,65	24	0,40	sable, sable argileux, argile et concr. calc.
239	7-8-58	Kanyosha	6	30,00	25,00	-	-	13,47	4	0,48	argile, sable, gravier, argilite, concr. calc.
244	8-9-58	Kanyosha	6	48,00	39,00	-	-	5,27	4	0,48	sable, sable argileux, gravier
248	9-12-58	Kadjeke	6	25,00	-	-	-	-	-	-	argile, argile sableuse et calc., gravier
249	12-12-58	Kadjeke	6	40,00	-	-	-	-	-	-	argile,argile sableuse,gravier,micaschiste à 37 m
253	12-58 à 59	Randa	6	57,00	21,00	-	-	13,50	1,06	0,018	argile, gravier, argilite, argile calc.
274	2-9-59	Mpanda	12,6	55,00	45,00	-	-	21,50	0,36	0,003	argile, sable, gravier, argile calc., granite à 55 m
228-1	2-9-59	Bujumbura	6	76,00	69,00	-	-	45,50	4	0,32	argile, sable, gravier
228-2	10-12-60	Bujumbura	6	72,00	67,00	-	-	53,67	2,16	0,05	argile, sable, gravier.

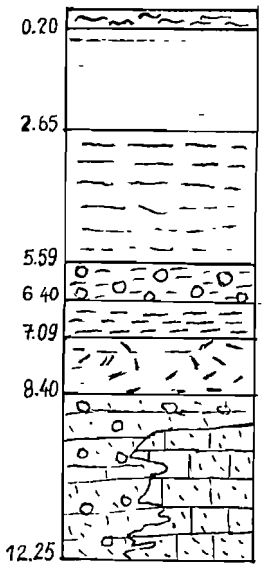
ANNEXE I.3: OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTION DES PROFILS DANS LA REGION DE BUJUMBURA.

I.3.1. Profils de sondage (Laboratoire National des Travaux Publics).

Les observations de terrain réfèrent à la description de quelques profils de sondage effectués par le Laboratoire National des Travaux Publics (L.N.T.P) dans des sites en milieu urbain.
Les profils retenus sont ceux qui présentent un ou plusieurs niveaux (horizons) d'argile noire.

*** Sondage 7** (échelle: 1/100): Site de KIGOBE, régulièrement occupé par des cultures vivrières (haricots, maïs) ou industrielles (coton).

Sondage 7 (échelle :1/100) : Site de Kigobe (régulièrement occupé par des cultures vivrières (haricots, maïs) ou industrielles (coton).



Sol humique.

Argile brunâtre avec sol limonitique (silt).

Argile noirâtre

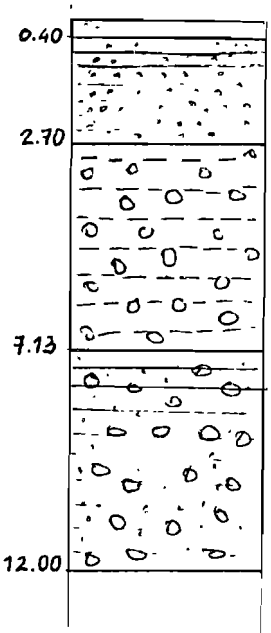
Argile graveleuse noirâtre

Argile noirâtre

Argile rougeâtre

Argile brunâtre avec beaucoup de croûtes de calcaires + gravier fortement induré.

Sondage 28 : Dans le même site de Kigobe (Kamenge)



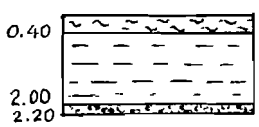
Sol Humique.

Argile brunâtre avec sol limonique.

Argile noirâtre avec gravier (peu abondant)

Argile brunâtre avec gravier.

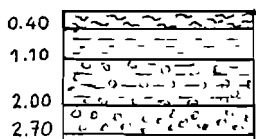
Sondage 23 : Près du port de Bujumbura.



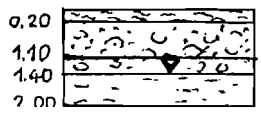
Terre végétale.

Argile noire compacte.
Sable gris purvélurent .
(tacheté du noir).

Deux autres profils dans le même sites méritent une attention par leurs niveaux d'argiles noires.



Terre végétale
Argile noire compacte. (niveau de la nappe phréatique).
Sable argileux noirâtre.
Sable grisâtre à noirâtre pulvérulent + nicas.



Terre végétale.
Sable beige pulvérulent + restes de coquillages.
niveau phréatique

DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE (Université du Burundi)

BUJUMBURA

Localisation Hopital Roi KHALED — Echantillonnage G NGENDAKUMANA

Profondeur 200 cm

Terminé Juillet 1989

Profondeur (cm)	N° d'Ech	Lithologie	Description
20	H10		Couche brune gréso-argileuse avec beaucoup de traces jaunes d'oxydes de fer
40	H11		
70	H12		Couche grise - blanchâtre claire de sable fin
90	H13		Couche d'argile brune à noire un peu gréseuse, avec beaucoup d'oxyde de fer
110	H14		
130	H15		Argile noire (smectites)
150	H16		Argile ocre, claire peu gréseuse avec traces de carbonates
170	H17		
200	H18		
	H19	40 cm	Argile ocre + carbonate + paillettes muscovite + grains de quartz + oxydes de fer (jaunes)

BUJUMBURA
Log schématique du Puits Hôpital Roi Khaled.

ANNEXE I.4: OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTIONS DES PROFILS DANS LA REGION DE RUMONGE.

I.4.1. Observations de terrain.

15: - Dans la dépression de KAGOTI (rivière): plage d'argiles noires (mise en valeur par la culture du riz) localisée entre le km 78,00 et km 78,50 le long de la Route Nationale n°3 Bujumbura - Nyanza-Lac (sur le côté Est de la route). La dépression montre le caractère foncé (noirâtre) des argiles. Cette plage est située juste en contre-bas des collines précambriennes.

Localisation et description des puits 15A et 15B (décrits par Ngendakumana G.):

- à proximité de la route RN.3, au km 78,00 (sur le côté Est de la RN.3).
- Quinze (15A) et seize (15B) échantillons ont été prélevés à une maille de 20Cm, sur une profondeur de 3,00m.

I.4.2. Description des profils.

Profil CP2.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

Numéro du profil:	CP2.
Unité supérieure de classification:	argile noire tropicale (Udic pellustert).
Date de la description:	17/09/1981.
Auteur de la description:	Opdecamp L.
Localisation:	Mutambara à Rumonge, au niveau de la bifurcation de la route Nyanza-Lac vers Bururi; grande plaine rizicole.
Altitude:	800m.

Géomorphologie:
- position topographique: plaine.
- géomorphologie de la zone circonvoisine: vallonnée.
- micro-relief: quelques termitières.

Région de RUMONGE

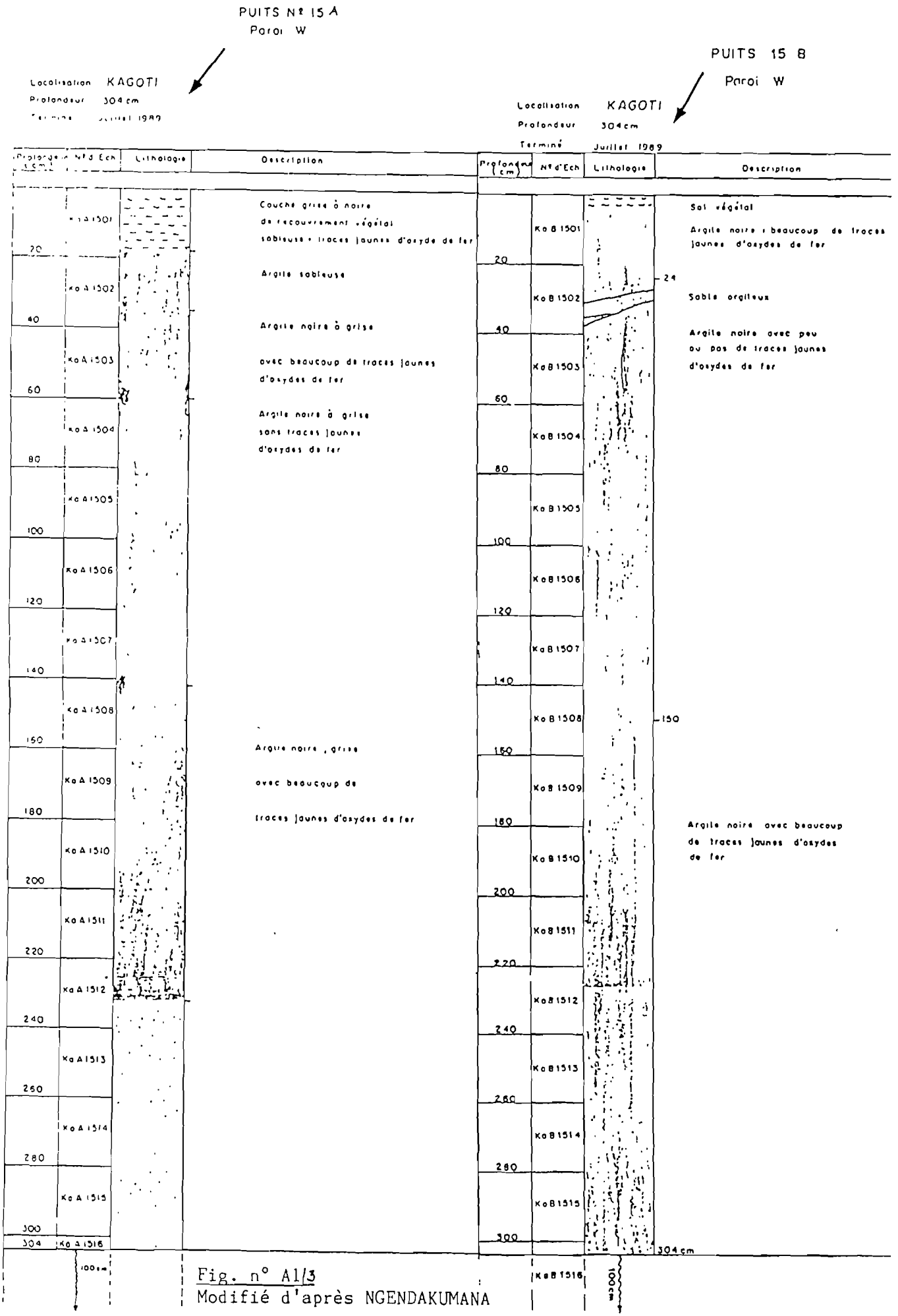


Fig. n° A1/3

Modifié d'après NGENDAKUMANA

(Université du Burundi.

Pente à l'emplacement du profil:	1%; quasi-nulle.
Utilisation du sol:	riziculture de nappe.
Climat:	$((Aw_4)_s$; tropical humide à 4 mois de saison sèche.

II. Informations générales concernant le sol:

Roche-mère:	alluvion fluvio-lacustre.
Drainage:	pauvre.
Etat hydrique:	sec jusqu'à 40Cm.
Profondeur de la nappe phréatique:	supérieure à 2m.
Pierrosité superficielle:	non pierreux.
Affleurement rocheux:	non rocheux.
Traces d'érosion:	non détectées.
Présence de sels ou d'alcalis:	non détectée.
Influence humaine:	culture de riz; labour mécanique.

III. Description des horizons.

Apg	0 - 15Cm	Gris très foncé (10YR 3/1) frais; gris foncé (10YR 4/1) sec; limon argileux lourd; assez nombreuses taches, moyennes, distinctes; (10YR 5/8); massif; peu collant, plastique; nombreux pores tubulaires fins; nombreuses racines; transition graduelle et régulière; échantillon CP2-1.
Cg	15 - 45Cm	Gris (10YR 5/1) frais, gris pâle (10YR 7/1) sec; limon argileux lourd; nombreuses taches moyennes, distinctes (10YR 5/8), massif, peu collant, plastique; nombreux pores tubulaires moyens; racines peu nombreuses, fines; transition graduelle et ondulantle; échantillon CP2-2.
IIC	45 - 95Cm	Gris foncé à gris très foncé (5YR 4/1-3/1); limon argileux très lourd; assez nombreuses taches, grandes, distinctes (10YR 5/6); prismatiques très grossier; collant, plastique; peu nombreux pores tubulaires fins; faces de pression; racines peu nombreuses et fines; transition graduelle et ondulante; échantillon CP2-3.

IIC	95 - 150Cm	Gris très foncé (10YR 3/1); argileux très lourd; assez nombreuses taches, grandes, distinctes (10YR 5/6); massif; collant, plastique; nombreux miroirs de glissement; racines rares à absentes; échantillon CP2-4.

I.5. OBSERVATIONS DE TERRAIN et DESCRIPTION DES PROFILS DANS LA REGION DE NYANZA-LAC.

I.5.1. Observations de terrain.

11-12-13: Au km 121,5, en contre-bas de la Route Nationale (RN.3) Bujumbura-Nyanza-Lac.
14: - Le long du cours de la GIFURUZI et dans sa vallée, argiles noires à la surface desquelles il apparaît des taches de rouilles (ramenées de profondeur), avec des fentes de dessication bien développées dans tout le profil (présence de faces striées).
- Les profils pédologiques, localisés à environ dix mètres de la RN.3 ont été décrits par Ngendakumana (puits 11 et 13, cfr. annexe I.5.2)
- Echantillonnage dans la vallée de la GIFURUZI (tous les vingt centimètres) par Chartry.
Le point (14) est situé au km 118,2 sur la RN.3, dans la vallée de la GIFURUZI).
- Des concrétions carbonatées apparaissent tout le long du profil pédologique sous forme de petits amas nodulaires blanchâtres (du même type que celles observées dans les autres régions de la plaine).

I.5.2. Description du puits G 14.

I. Localisation à proximité immédiate sur le ruisseau GIFURUZI, au Nord de Nyanza-Lac.

II. Description du puits. (Figure).

I.5.3. Description de profil.

Profil NL 14.

I. Informations concernant la station échantillonnée.

DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE
Matériaux de construction
PUITS N° 11
Paroi W

Localisation : RWABA (NYANZA-LAC)
Profondeur : 175 cm
Terminé : Juillet 1989

DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE
Matériaux de construction
PUITS N° 13
Paroi W

Localisation : RWABA (NYANZA-LAC)
Profondeur : 200 cm
Terminé : Juillet 1989

DEPARTEMENT DE LA GEOLOGIE
Matériaux de construction
PUITS N° 14
Paroi 210

Localisation GIFURUZI (Nyanza-Lac)
Profondeur : 210 cm
Terminé : Juillet 1989

Profondeur (cm)	N° d'Ech.	Lithologie	Description
20	RW 1101		Couvert végétal
40	RW 1102		Argile brune - noire avec traces jaunes et rouges d'oxydes de fer
60	RW 1103		
80	RW 1104		Mélange argile - sable
100	RW 1105		Sable argileux brun à noir
120	RW 1106		
140	RW 1107		
160	RW 1108		
175	RW 1109		
		100 cm	Couche argilo - sableuse à dominante majeure argile noire

N° d'Ech.	Lithologie	Description
RW 1301		Sol végétal mélangé à argile noirâtre
RW 1302		Argile noirâtre avec quelques traces jaunâtres d'oxydes de fer
RW 1303		
RW 1304		
RW 1305		
RW 1306		
RW 1307		Argile brune, un peu sableuse avec traces blanchâtres de carbonates
RW 1308		
RW 1309		
RW 1310		
RW 1311		Argile brune sableuse
100 cm		Sable fin argileux

N° d'Ech.	Lithologie	Description
G 1401		Couvert végétal + argile noire
G 1402		Argile très noire avec traces de morceaux de carbonates blanchâtres
G 1403		
G 1404		
G 1405		Mélange argile noire et argile grisâtre - brune + traces d'oxydes de fer
G 1406		Argile brune jaunâtre à grisâtre + oxydes de fer
G 1407		
G 1408		+ quelques petits galets de quartz
G 1409		
G 1410		
74 cm		

Documents modifiés d'après NGENDAKUMANA*

Echantillonnage : G. NGENDAKUMANA

*Département de Géologie (Université du Burundi) Matériaux de construction.

Classification INEAC:	Argile noire tropicale à hydromorphie.
Date de la description:	22/11/1979.
Localisation:	Sur la route Nyanza-Lac - Bujumbura, dans les alluvions de la RWABA.
Altitude:	800m.
Géomorphologie:	vallée de la RWABA, sur terrasse moyenne.
Pente à l'emplacement du profil:	1%.
Utilisation du sol:	palmeraie.

II. Informations générales concernant le sol.

Roche-mère:	argiles et limons d'origine alluviale.
Drainage externe:	imparfait.
Drainage interne:	imparfait.
Etat hydrique du sol:	frais.
Profondeur de la nappe phréatique:	à 1,50m.
Pierrosité superficielle:	inexistante.
Affleurements rocheux:	absents.
Erosion:	nulle.
Développement du système racinaire:	maximum dans les 20 premiers centimètres.
Présence de sels:	non apparente.

III. Description des horizons.

Ap 0 - 20Cm NL 14-1	Brun foncé (7,5 YR 3/2) frais; limon argileux; blocs angulaires fins, bien développés; friable, peu plastique; racines fines et très fines assez abondantes; transition distincte et régulière.
C 20 - 75Cm NL 14-2	Brun à brun foncé (7,5 YR 4/2) frais; plus de 50% de taches distinctes rouge-jaunâtre; limon argileux lourd; blocs angulaires moyens et grossiers bien développés; friable; plastique; peu de racines fines; présence de nombreuses faces de glissement. Transition diffuse et régulière.
C 75 - 120Cm NL 14-3	Gris très foncé (10 YR 3/1) frais; 25 - 50% de taches distinctes brun foncé (5 YR 5/6) frais; limon argileux lourd, massif, friable.

N.B: L'échantillon NL 14-4 a été prélevé entre 120 - 150Cm.

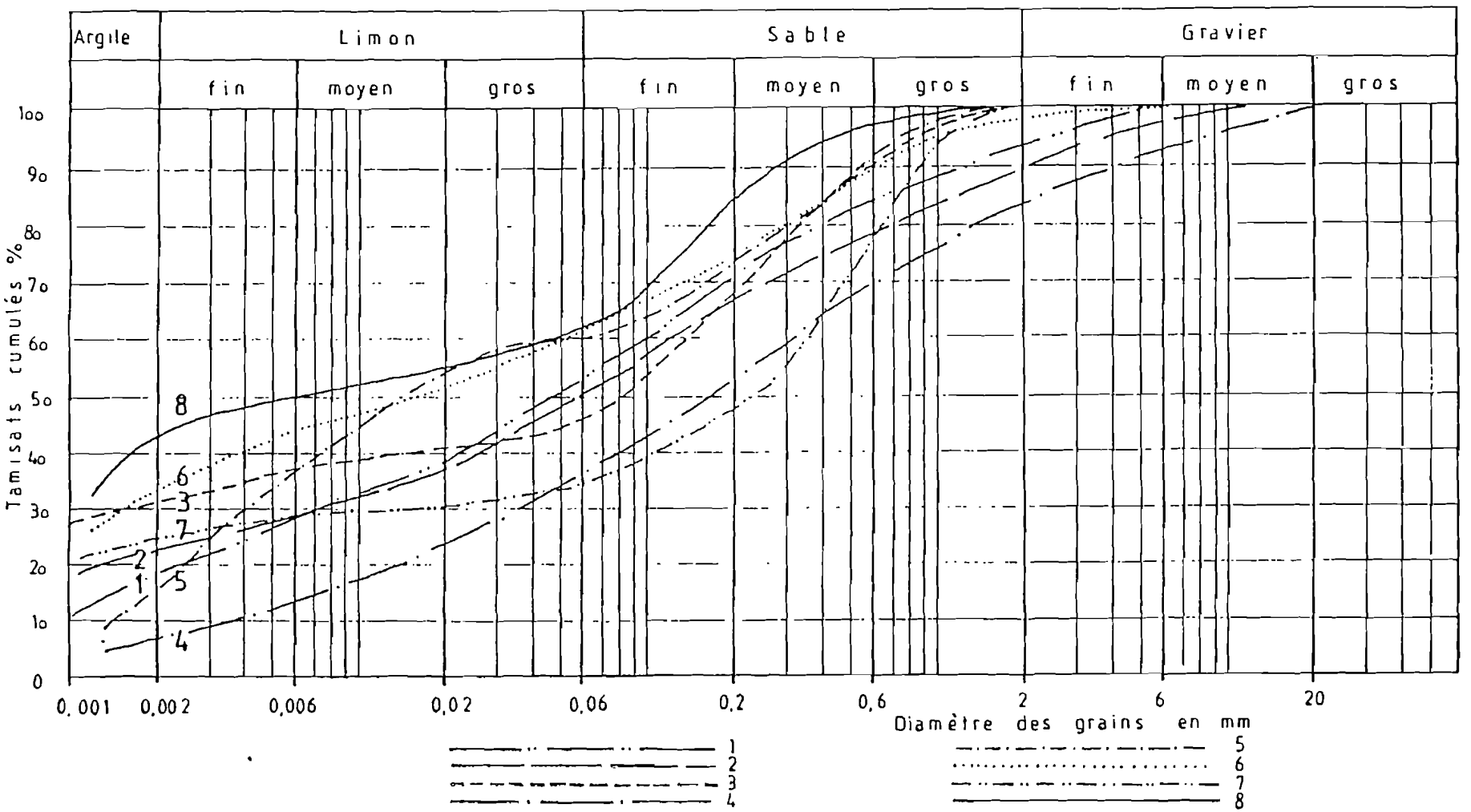
ANNEXE II. ANALYSES GRANULOMETRIQUES.

L'étude de la granulométrie des vertisols et sols vertiques, a été réalisée à l'Université du Burundi, dans le Service du Prof. K. Müller (Faculté des Sciences Appliquées) d'une part.

D'autre part, des données analytiques sur la granulométrie des vertisols, ont été reccueillies à partir des travaux de pédologues de l'ISABU. Les résultats y relatifs sont présentés dans cette annexe sous forme de bulletins analytiques.

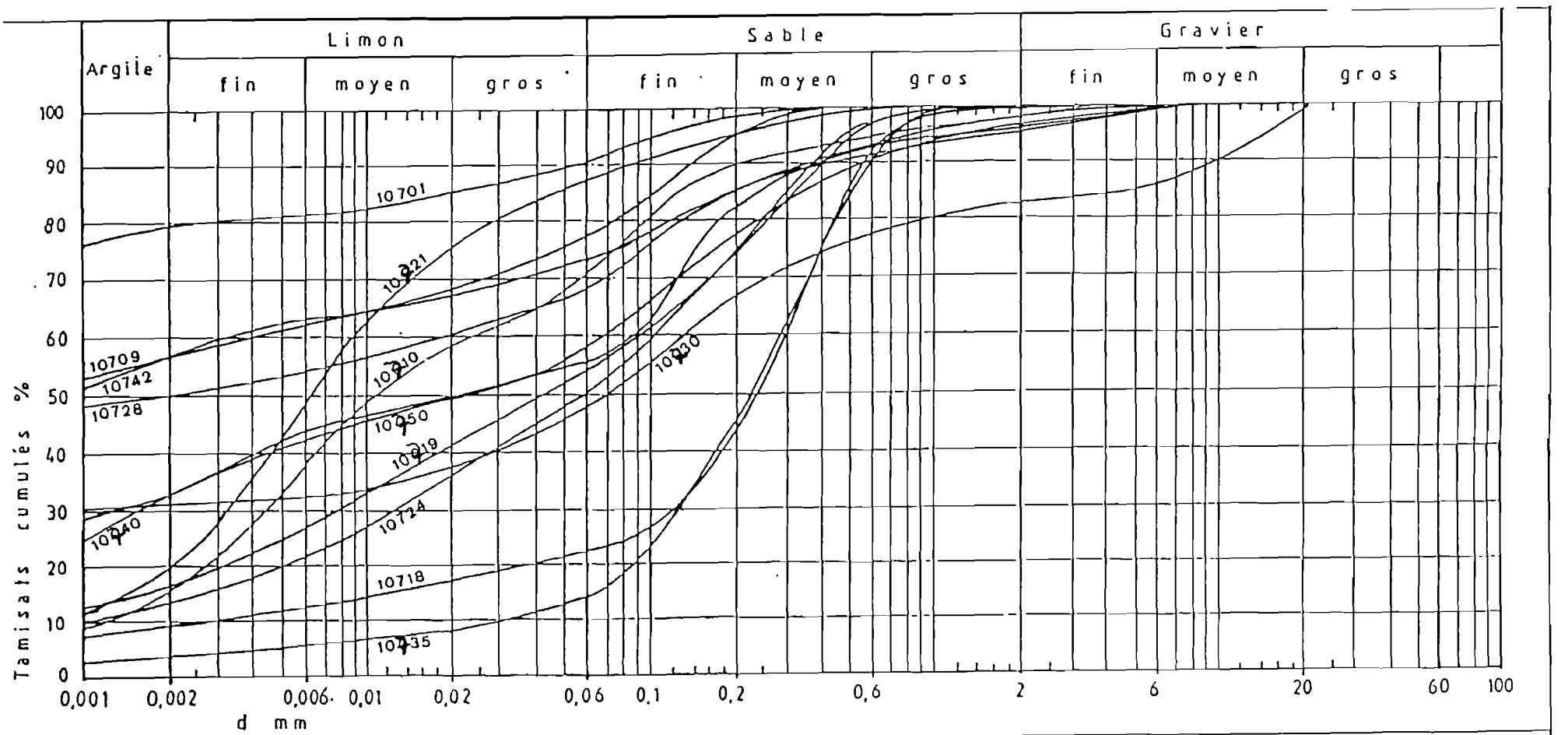
II.1. Analyses granulométriques effectuées à l'Université du Burundi.

Vingt-et-un échantillons ont été analysés. Les résultats sont présentés dans la figure suivante, sous forme de courbes de distribution granulométriques.



Courbes granulometriques.

Figure II.2: Courbes de distribution granulométrique de quelques échantillons de vertisols. Les pressions de gonflement ont été déterminés pour ces échantillons (Muller et Diel, 1991).



Annexe II. 2 : Courbes granulométriques complémentaires d'échantillons de vertisols issus des différentes régions inverstiguées.

Tableau n°10

Origine: RUMONGE

N°	REFUS			GRANULOMETRIE EN % (micron)						
	en	0	2	20	50	100	250	500	1000	
Pros.	%	2	20	50	100	250	500	1000	2000	
R 254	0									
R 255	0	19.4	33.3	26.3	8	6.4	3.2	1.9	1.5	
R 256	0	68.6	10.2	9.4	3.1	3.7	2.2	1.8	1	
R 257	0									

Tableau n°11

Origine: BLOC RUMONGE

Profil : NL 14

N°	Prof.	Horiz.	Couleur	Ref. à	Granulométrie (µ) en %								Matière organique		
			Sol												
			humide	2mm	0	2	20	50	100	250	500	1000	C	N	C/N
Labo	en cm	génét	Munsell	%	2	20	50	100	250	500	1000	2000	%	%	
14_1	0-20	Ap	7,5 YR 3/4	6.23	44.6	20.9	6.3	1.64	1.93	1.46	7.6	15.6	1.26	0.12	10.5
2	20-75	C	7,5 YR 4/2	0	53.2	32.5	11.9	0.96	0.76	0.34	0.16	0.08	0.89	0.1	8.9
3	75-120	C	10 YR 3/1	0	36.7	14.1	9.56	7.81	15.8	8.95	4.9	2.17	0.38	0.06	6.33

Tableau n°10

Origine: RUMONGE

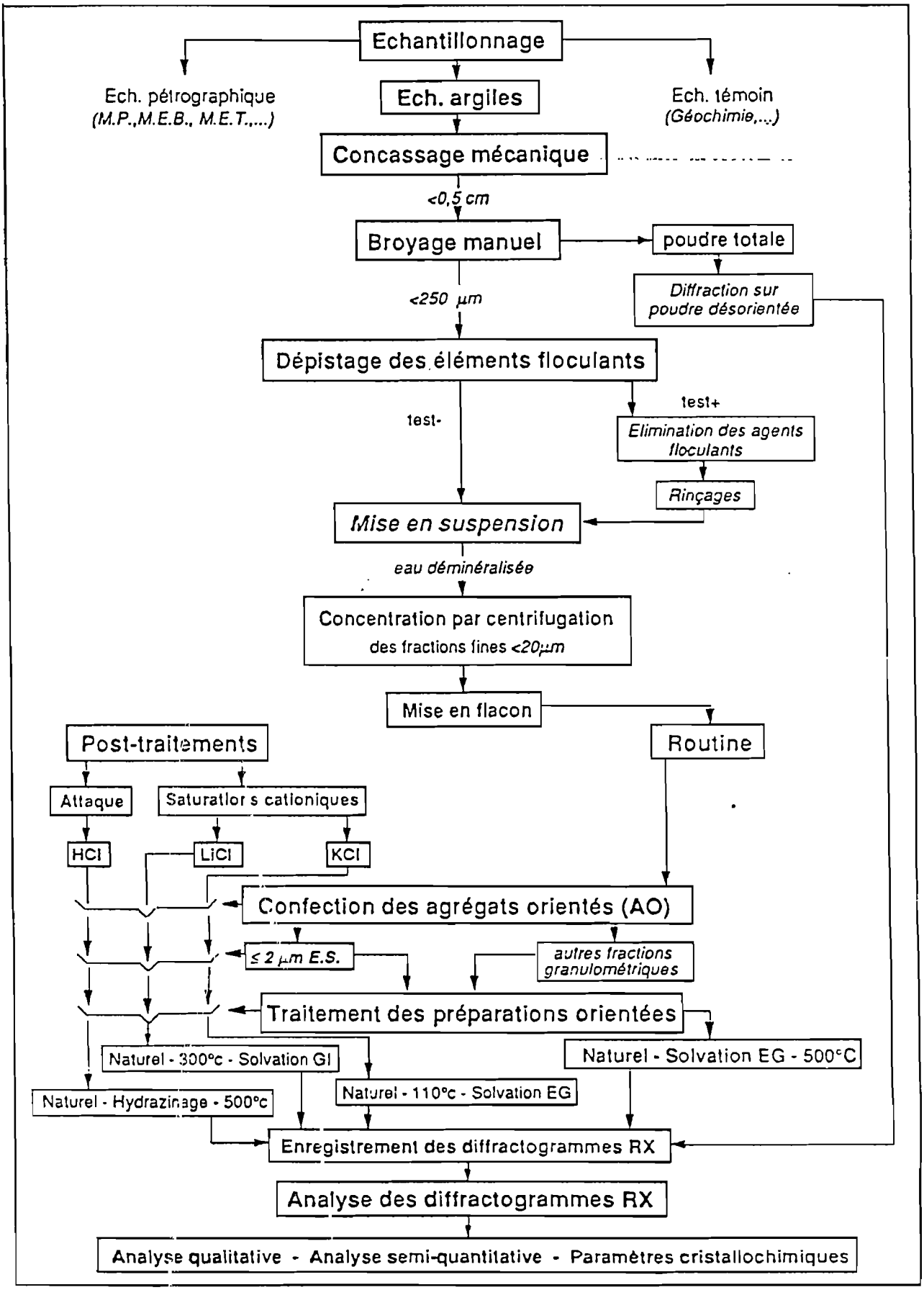
N°	REFUS			GRANULOMETRIE EN % (micron)						
	en	0	2	20	50	100	250	500	1000	
Pros.	%	2	20	50	100	250	500	1000	2000	
R 254	0									
R 255	0	19.4	33.3	26.3	8	6.4	3.2	1.9	1.5	
R 256	0	68.6	10.2	9.4	3.1	3.7	2.2	1.8	1	
R 257	0									

Tableau n°11

Origine: BLOC RUMONGE

Profil : NL 14

N°	Prof.	Horiz.	Couleur	Ref. à			Granulométrie (µ) en %						Matière organique		
			Sol												
			humide	2mm	0	2	20	50	100	250	500	1000	C	N	C/N
Labo	en cm	génét	Munsell	%	2	20	50	100	250	500	1000	2000	%	%	
14_1	0-20	Ap	7,5 YR 3/4	6.23	44.6	20.9	6.3	1.64	1.93	1.46	7.6	15.6	1.26	0 12	10.5
2	20-75	C	7,5 YR 4/2	0	53.2	32.5	11.9	0.96	0.76	0.34	0.16	0.08	0.89	0.1	8.9
3	75-120	C	10 YR 3/1	0	36.7	14.1	9.56	7.81	15.8	8.95	4.9	2.17	0.38	0.06	6.33


Echantillonnage
Ech. pétrographique
(M.P.,M.E.B., M.E.T.,...)
Ech. argiles
Ech. témoin
(Géochimie,...)
Concassage mécanique
<0,5 cm
Broyage manuel
poudre totale
Diffraction sur poudre désorientée
<250 µm
Dépistage des éléments floculants
test-
test+
Elimination des agents floculants
Rinçages
Mise en suspension
eau déminéralisée
Concentration par centrifugation
des fractions fines <20µm
Mise en flacon
Routine
Post-traitements
Attaque
Saturations cationiques
HCl
LiCl
KCl
Confection des agrégats orientés (AO)
≤ 2 µm E.S.
autres fractions granulométriques
Traitement des préparations orientées
Naturel - 300°c - Solvation Gl
Naturel - Solvation EG - 500°C
Naturel - Hydrazinage - 500°c
Naturel - 110°c - Solvation EG
Enregistrement des diffractogrammes RX
Analyse des diffractogrammes RX
Analyse qualitative - Analyse semi-quantitative - Paramètres cristallochimiques

ANNEXE III: ANALYSES MINERALOGIQUES AUX RAYONS-X: METHODOLOGIE; CLASSIFICATION et COMPARAISON.

L'étude minéralogique des échantillons d'argiles smectitiques, a été réalisée grâce à la contribution scientifique de Monsieur Goemaere (Laboratoire de Géologie des Argiles, Belgique).

L'analyse diffractométrique a été réalisée sur des préparations orientées (contenant la fractioon inférieure à 2µm) et sur des poudres désorientées du matériau argileux total.

Le protocole préparatoire utilisé est décrit dans la figure 1.

L'orientation préférencielle des particules argileuses est obtenue selon la méthode de sédimentation de la suspension sur lame de verre.

III.1. Tests en routine sur agrégats orientés (A.O) (fraction < 2µm ES).

Les traitements diagnostiques en routine, qui conduisent à la détermination minéralogique, consistent en trois passages (en séquences) des A.O au diffractomètre:

- échantillon séché à l'air libre (**échantillon naturel, N**);
- échantillon **solvaté aux vapeurs d'éthylène-glycol** (douze heures dans une enceinte saturée en vapeur d'EG, pour voir s'il y'a gonflement ou non);
- échantillon **chauffé à 500°C**/ 4heures (Q_{500}).

Ces trois tests en routine (**N, EG** et Q_{500}) suffisent pour identifier la plupart des minéraux argileux au rang des groupes, et de suspecter la présence d'autres constituants.

Ces tests sont codifiés sous forme de l'icône (ou cartouche) suivante:

N - EG - Q_{500}.

Contrairement aux autres laboratoires, ces tests sont **conduits sur le même** A.O, dans des **conditions de diffraction rigoureusement identiques.** On n'obtient que les réflexions (001) (avantage de la diffractométrie sur A.O).

Les informations analytiques (qualitatives et quantitatives) sont basées nottament sur les intensités relatives de ces réflexions (essentiellement les réflexions basales): les intensités (001) pour les minéraux argileux simples, et (002) pour les interstratifiés réguliers.

Les situations des réflexions (001) sont reportées dans les tableaux suivants:

*** Tableau n°1: Pour les minéraux argileux simples:**

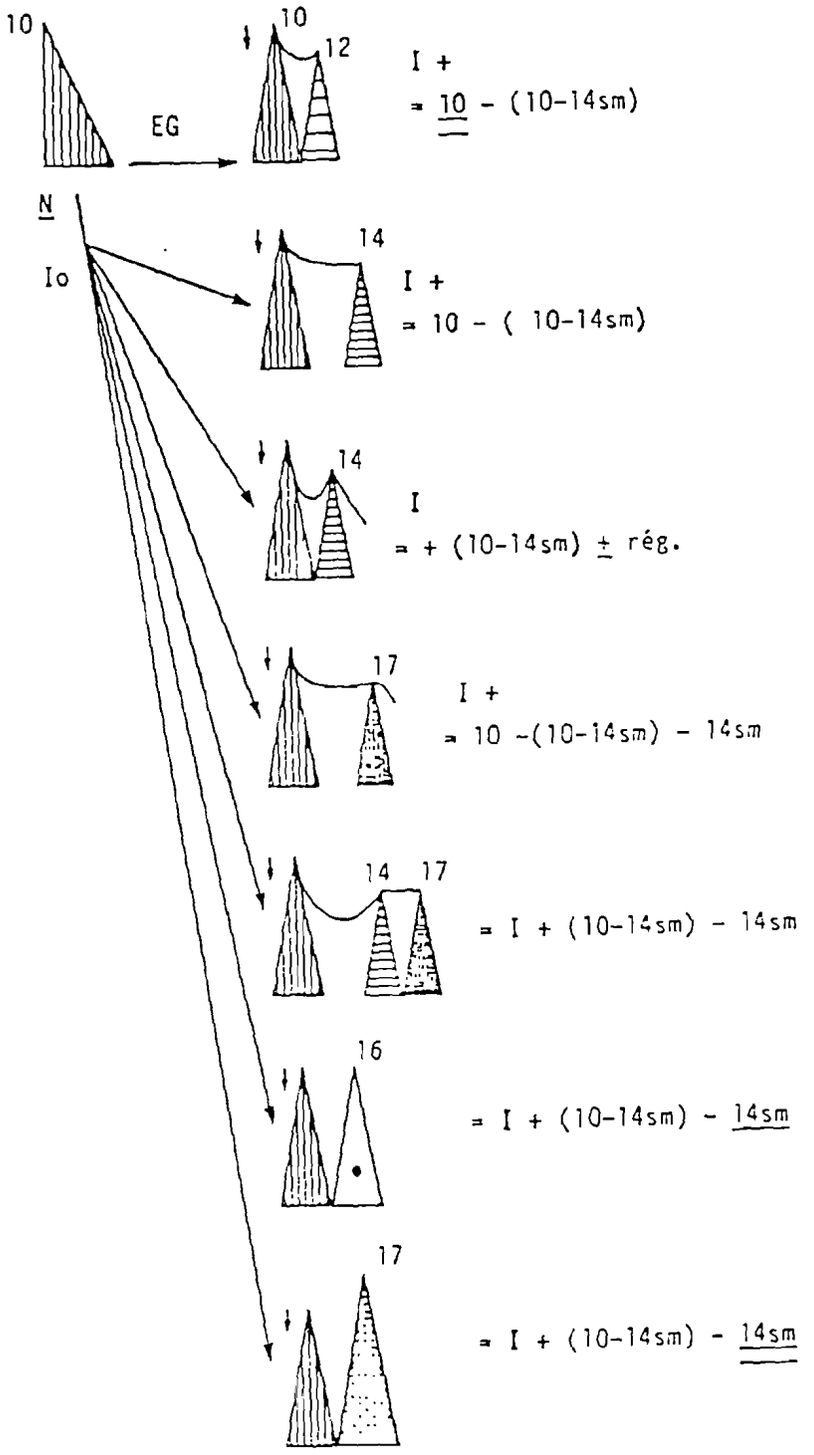


Fig. 39 : Identification en routine de l'interstratifié (10-14sm) - 14sm associé à de l'illite.

	N	EG	Q_{500}
Kaolinite	7	7	-
Illite	10	10	10
Chlorite	14	14	14
Vermiculite	14	14	10
Smectite	12-15	17	10
Chlorite gonflante	14	17	14

**** Tableau n° 2: Pour les interstratifiés réguliers:**

	N	EG	Q_{500}
(I-C)	12	12	12
(I-V)	12	12	10
(I-Sm)	12	13,5	10
(C-Sm)	14	15,5	10
(C-Cg)	14	15,5	14

Les intensités relatives des réflexions sont obtenues par la mesure de la **hauteur de la réflexion** sur chacun des trois diffractogrammes enregistrés en routine (N, EG, Q_{500}). On la mesure depuis l'apex des réflexions jusqu'au bruit de fond reconstitué. Les intensités sont alors sommées, et la somme ramenée à 100 par la règle de trois simple. (Exemple sur la figure 2).

Pour les interstratifiés irréguliers dont le plus souvent seule se trouve exprimée la réflexion (002) sous forme d'une bande de diffraction, l'intensité correspond à la **hauteur à mi-largeur** de la bande de diffraction (002).

La détermination du taux d'interstratification des feuillets smectitiques dans les interstratifiés irréguliers I/Sm, a été tentée mais sans grand succès, en raison du faible taux de feuillets smectitiques, et de la présence, en parallèle, d'une fraction micacée, ou de l'occurrence d'un assemblage composé de plusieurs interstratifiés irréguliers.

La méthode est dite **semi-quantitative** car elle utilise des intensités brutes (c'est-à-dire sans les

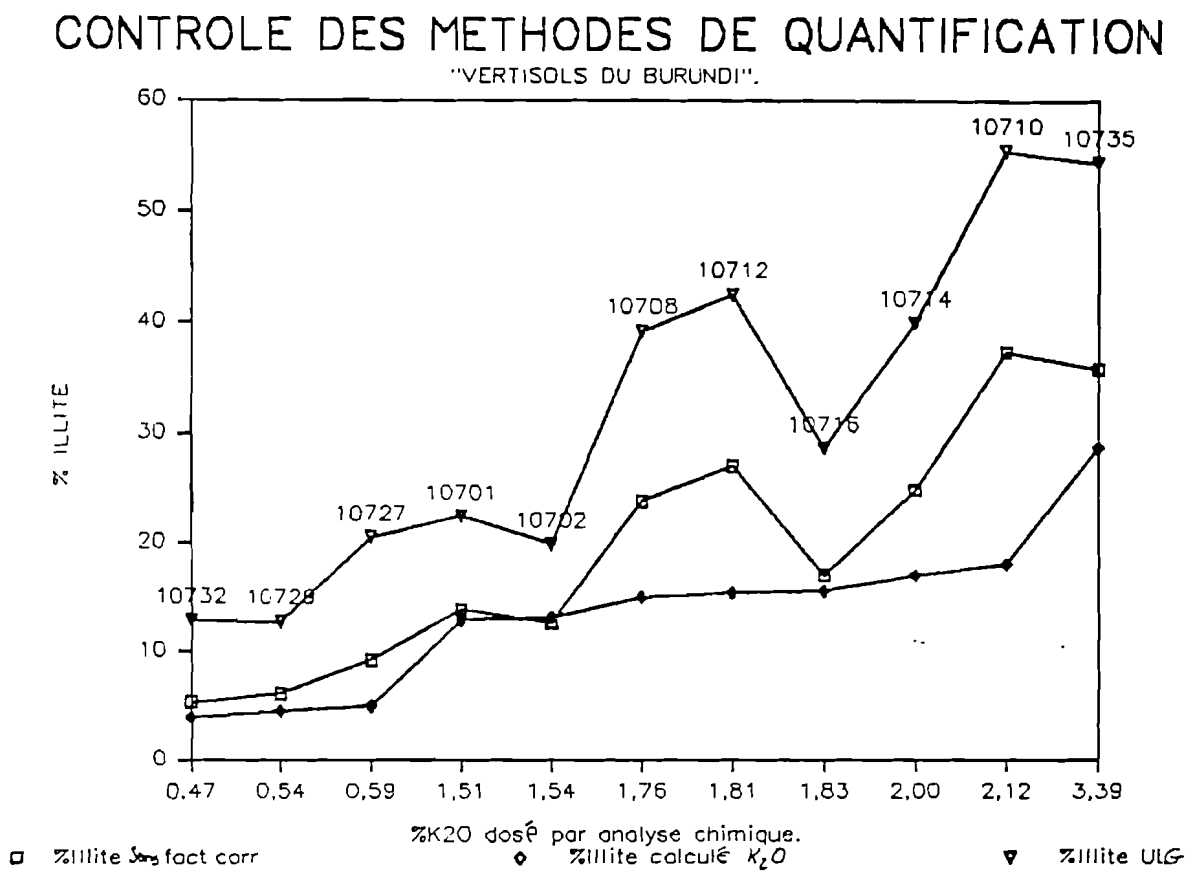


Figure : Quantification des illites des vertisols burundais. Comparaison entre le %Illite calculé par analyse chimique et le %Illite déterminé par diffractométrie.

multiplier par le facteur correctif propre pour chaque constituant minéralogique). Elle se fonde sur les deux assomptions suivantes:

- les minéraux phyllosilicatés argileux représentent 100% de la fraction granulométrique analysée (< à 2µm). Les autres minéraux (quartz, feldspaths, oxydes, hydroxydes, composés amorphes...) sont exclus de la quantification, même si par leur granulométrie ils sont présents dans la fraction argileuse.
- le degré de diffractibilité des minéraux argileux d'une même espèce, dépend de la composition chimique et de la cristallinité, mais est considéré ici comme constant.

De telles hypothèses font qu'on ne se limite qu'à une quantification relative (une quantification absolue n'est jamais atteinte). La plus simple et la "moins dangereuse" méthode de quantification consisterait à l'appréciation de l'abondance par des signes "+" (+: présent; ++: abondant; +++: très abondant; (+): accessoire). Mais on ne peut pas imaginer un tel système de croix pour une centaine d'échantillons.

Dans ce travail, la méthode de quantification par des intensités brutes est plus adequate que celle de la quantification par les facteurs correctifs utilisée classiquement à Liège. Il est apparu que cette dernière surestime largement les illites (minéraux de référence dans la méthode) au dépens des autres minéraux, et surtout les minéraux smectitiques. Les teneurs en illites ont été calculées simplement en multipliant les % K_2O (dosés par spectrométrie d'absorption atomique) par la teneur estimée en K_2O des illites (8,5%). Ces calculs ont été faits sur base des postulats qui ne sont pas parfaitement respectés à savoir:

1° que tout le K est localisé dans les seules illites.

2° une teneur estimée en K_2O de 8,5% pour les illites.

3° que les minéraux argileux représentent 100% de l'assemblage argileux.

La véracité de ces postulats est mise en doute par les faits suivants:

1° la présence de minéraux non argileux (quartz et feldspaths surtout);

2° la présence de micas muscovitiques dans la fraction fine, ainsi que les substitutions de K par Ca, éventuelles;

3° une partie du K peut être présente dans les intertratifiés irréguliers illites-smectites, et induit une légère surestimation du % d'illites s.s;

4° en pratique, il est impossible de doser le K_2O dans les illites seules.

Les teneurs en illites calculées (sur base des % en K_2O et des postulats ci-haut cités) et comparées par deux méthodes de quantification (méthode ULg. et intensités brutes) (fig. 3), montrent que la méthode de quantification par les facteurs correctifs surestime largement les illites au dépens des autres minéraux.

S'il s'agit d'estimations semi-quantitatives destinées à mettre en évidence des tendances spacio-temporelles dans des matériaux analogues, cette surestimation n'est pas gênante (erreur reproduite pour l'ensemble de la série des échantillons).

Par contre, sur le plan appliqué (géotechnique ou industriel), la sous-estimation des minéraux smectitiques n'est pas souhaitable. C'est surtout la quantification des fractions gonflantes ("poisons" en mécanique des sols) qui doit être la plus réélle possible. Il serait plutôt plus "confortable" pour l'esprit, que la méthode de quantification "surestime" légèrement les minéraux "sensibles" (smectitiques), de manière à doter le géotechnicien d'un coefficient de sécurité dans son choix d'une méthode de mise en oeuvre d'un matériau à argiles gonflantes.

La méthode de quantification par les intensités brutes apparaît beaucoup plus adequate: elle relie le mieux les données de l'analyse chimique et celles de la diffractométrie. Pour 50% des échantillons, il y'a une concordance parfaite entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Pour les 50 autres, la diffractométrie surestime légèrement les résultats. En pratique, cette légère surestimation trouve aisément sa justification par l'examen attentif des diffractogrammes, montrant que les postulats initiaux ne sont pas parfaitement respectés, en particulier la présence de minéraux non phyllosilicatés (quartz, feldspaths).

Tout en ayant à l'esprit ses limites (dont l'inventaire est repris dans le tableau 3), la méthode de quantification par intensités brutes, a été adoptée dans le cadre de cette étude.

Le recours à des rapports d'intensités des réflexions (001), permet de ramener les "erreurs de mesures" (les sous-estimations et/ou les surestimations des composants argileux) à l'équilibre (Goemaere, 1991).

Tableau 3: Quelques facteurs influençant l'analyse diffractométrique en A.O.

Ceux-ci trouvent leurs sources (Goemaere, 1991):

1° dans les méthodes de préparation:

- la représentativité de la fraction "2μm";
- les limites d'application de la loi de Stokes;
- la sédimentation différentielle des particules sur lame de verre au cours du séchage;
- le choix de pré-traitements,...

2° dans les paramètres intégrant à la fois l'analyste et le préparateur:

- la reproductibilité dans la confection des A.O.;
- les concentrations équivalentes en minéraux sur L.O.;

- le tracé du bruit de fond du diffractogramme;
- l'analyse qualitative, variable d'une "école" à l'autre;
- le choix de la méthode de quantification.

3° dans le type du diffractomètre, le procédé d'enregistrement et l'ensemble des "variables" diffractométriques:

- nature de l'anti-cathode;
- tension et ampérage appliqués au tube;
- utilisation d'un monochromateur;
- vitesse de balayage du goniomètre,...

On doit ajouter d'autres facteurs, **intrinsèques** (le degré de cristallinité; la taille des cristallites; l'orientation des particules qui peut être perturbée dans l'A.O. par la présence de minéraux à habitus non planaire: quartz, feldspaths,..; les substitutions isomorphiques; les superpositions de réflexions; le degré d'hydratation de certains minéraux;...) et **extrinsèques** (les conditions opératoires).

Annexe III.2: Diffractométrie d'A.O. après saturation à l'hydrazine (HYD.).

Après une attaque préalable à HCl_{4N}, la saturation à l'hydrazine a été appliquée pour permettre la distinction entre kaolinite et Chlorite: en raison de leur présence dans les matériaux de référence, il s'observe une superposition des réflexions caractéristiques.

Ce test est en outre utilisé pour étudier la cristallinité de la kaolinite (permet de pister les kaolinites désordonnées) (Cases et al., 1982 repris par Nkurikiye, 1989).

Annexe III.3: Faciès des réflexions (001) au naturel(N) des smectites.

Au naturel(N), la réflexion (001) des smectites s.s est comprise entre 12 et 15Å. Cet espacement, généralement associé à la nature du cation interfoliaire (avec Na: d(001) vers 12Å; Ca: d(001) vers 14-15Å), fluctue surtout avec le degré d'humidité relative (RH). Un simple séchage sous lampe induit une déshydratation suffisante pour faire migrer une réflexion de 14,5Å (55%RH) à 12,5Å (Goemaere, 1991). Ce comportement met en exerque le danger de sécher les lames orientées avec un tel procédé. Le degré d'humidité relative doit se situer dans une gamme de travail acceptable (45 et 60% RH) et être contrôlé en permanence.

N.B: Le complexe Al_{17} (défini par Thorez, 1986) correspond à une **fraction de smectites** dont l'espacement basal se situe au naturel(N) à 17Å ou au-delà (sous forme d'une petite bande de diffraction de 17Å vers 20Å). Parfois, une réflexion peu intense, très évasée et située vers 8Å,

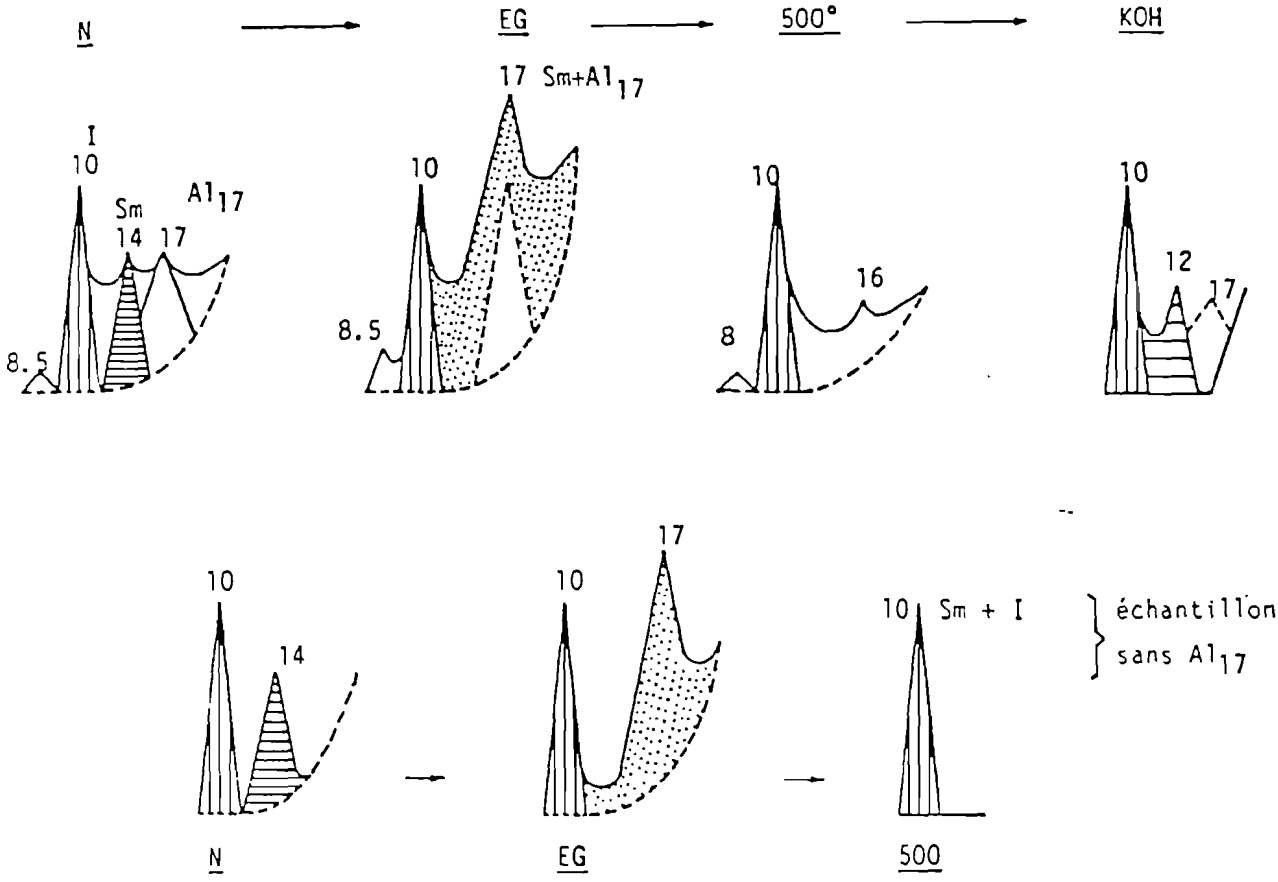


Fig. 38 : Edifice interstratifié Al_{17} : comportement aux tests (N, EG, 500, KOH) et problème de différentiation en présence de smectite. A titre de " standard " interne, les diffractogrammes schématisés dans cette figure incluent de l'illite et de la smectite.

correspond au d(002) de Al_{17}. (Fig.3).

Al_{17} constitue une smectite originelle dont les espaces interfoliaires ont été partiellement alumi-

A. LA PLAINE DE LA RUSIZI.

I. Plaine de l'IMBO NORD.

NUMERO	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Illite	Kaol	Halloy	Smect (10-14Å)		Al17 (10-14V)		Chlo.	Talc	Palyg.
9357	Imbo-Nord, N°4, 0,5m	28,7	10,1	0,0	45,5	5,1	10,7	0,0	0,0	0,0	-
9358	Imbo-Nord, N°5, 0,8-1,00m	37,0	27,8	0,0	19,9	4,4	9,8	0,0	1,1	0,0	-
9359	Imbo-Nord, N°6, T4, 1,00-1,20m	35,8	29,3	0,0	26,1	0,0	6,9	0,0	1,9	0,0	-
9360	Imbo-Nord, N°7, T4, 0,6-0,8m	24,1	0,0	38,0	0,0	0,0	38,0	0,0	0,0	0,0	-
9361	Imbo-Nord, N°8, T4, 0,3-0,5m	11,2	0,0	5,0	49,8	9,5	22,4	0,0	0,0	2,1	-
9362	Imbo-Nord, N°9, T3-T4, 0,6-0,8m	8,6	0,0	0,0	60,7	15,3	12,3	0,0	0,0	3,1	-
9363	Imbo-Nord, N°10, T4, 0,8-1,00m	21,4	3,4	0,0	41,2	15,3	18,7	0,0	0,0	0,0	-
11485	Imbo-Nord 1.1, gravière	4,1	4,9	0,0	83,7	0,0	7,3	0,0	0,0	0,0	-
11486	Imbo-Nord 1.2, idem 11485	2,3	2,6	0,0	90,9	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	-
11480	Imbo-Nord 6	4,9	0,0	0,0	90,7	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	-
11481	Imbo-Nord 7, idem 11480	11,9	0,0	0,0	74,2	0,0	8,2	5,7	0,0	0,0	-
11482	Imbo-Nord 9, après T4, RN5	6,7	7,1	0,0	63,4	0,0	18,3	0,0	4,5	0,0	-
11496	Imbo-Nord 12.1	3,5	14,9	0,0	75,9	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	-
11497	Imbo-Nord 12.2, RN5	24,3	33,9	0,0	29,6	9,6	2,6	0,0	0,0	0,0	-
11503	Imbo-Nord 14.6, T3, 25-50cm, RN5	5,5	2,5	0,0	83,8	0,0	8,2	0,0	0,0	0,0	-
11502	Imbo-Nord 14.5, T3, 50-80cm, RN5	8,6	2,9	0,0	80,2	0,0	8,3	0,0	0,0	0,0	-
11501	Imbo-Nord 14.4, T3, 80-100cm,RN5	3,4	1,0	0,0	83,5	0,0	8,1	0,0	4,0	0,0	-
11500	Imbo-Nord 14.3, T3, 100-120cm,RN5	4,2	1,4	0,0	83,1	0,0	11,3	0,0	0,0	0,0	-
11499	Imbo-Nord 14.2, T3, 120-140cm RN5	3,3	1,2	0,0	81,5	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0	-
11498	Imbo-Nord 14.1, T3, 140-150cm,RN5	3,5	0,0	0,0	88,9	0,0	7,5	0,0	0,0	0,0	-
11493	Imbo-Nord 11.1, 0-20cm, T4, RN5	9,4	5,8	0,0	76,1	0,0	8,7	0,0	0,0	0,0	-
11494	Imbo-Nord 11.2, 60-80cm, T4, RN5	7,0	5,6	0,0	75,5	0,0	11,9	0,0	0,0	0,0	-
11495	Imbo-Nord 11.3, 80-100cm, T4, RN5	19,4	0,0	21,4	47,3	0,0	11,9	0,0	0,0	0,0	-
11483	Imbo-Nord 15, Lac DOGODOGO	7,4	1,7	0,0	41,7	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	44,2
11484	Imbo-Nord 19,20-30cm,canal DOGODOGO	47,2	18,1	0,0	19,9	8,9	5,9	0,0	0,0	0,0	-
11492	Imbo-Nord 10.6, 25-50cm, DOGODOGO	14,5	5,8	0,0	50,8	7,1	16,4	5,5	0,0	0,0	-
11491	Imbo-Nord 10.5, 50-80cm, T4,DOGODOGO	17,7	4,8	0,0	42,6	6,5	11,1	15,7	1,5	0,0	-
11490	Imbo-Nord 10.4, 80-100cm, T4,DOGODOGO	21,5	5,1	0,0	38,4	11,0	17,3	6,8	0,0	0,0	-
11489	Imbo-Nord 10.3, 100-120cm, T4,DOGODOGO	19,9	5,8	0,0	47,7	9,4	9,7	6,1	1,4	0,0	-
11488	Imbo-Nord 10.2, 140-150cm, T4,DOGODOGO	17,7	5,8	0,0	52,6	6,5	12,6	4,8	0,0	0,0	-
11487	Imbo-Nord 10.1, 150-160cm, T4,DOGODOGO	14,3	5,1	0,0	47,1	4,6	20,6	8,3	0,0	0,0	-
11505	Imbo-Nord 17.2, 80-100cm,T5, DOGODOGO	22,0	21,7	0,0	45,0	0,0	11,3	0,0	0,0	0,0	-
11504	Imbo-Nord 17.1, 100-120cm,T5, DOGODOGO	29,5	17,4	0,0	37,0	0,0	14,2	0,0	0,0	0,0	-

. . . . . vertique brun foncé.

N° Labo	Horizon génétique	ARGILE					LIMONS								SABLES					
		K	Sm			Synthèse	Fins				Grossiers				Fins		Moyens		Grossiers.	
			Air	EG	550°		Q	Fp		Sm	Q	Fp		Sm	Q	Fp	Q	Fp	Q	Fp
P2257	A	tr	6	$\vec{6}$	2.5	Sm^3, $\hat{K}_{tr}$	4.5	1	Il 0.5		8.5	1	Il 1.5		20	0.5				
P2258	C_1	0.5	9	$\vec{7}$	$\hat{3}$	Sm^4, $\hat{K}_{tr}$														
P2259	C_2	0.5	13	$\vec{11}$	$\hat{5}$	Sm^5, $\hat{K}_{tr}$	3.5	1	Il 0.5		7	0.5	Il 0.5							
P2260	R_1	0.5	13	$\vec{11}$	$\hat{6}$	Sm^5, $(7\text{-}14Sm)_{tr}$	2	1.5	Cr M, A	+	1	2.5	Cr, M A, C	+	1.5	1.0	1.0	1.0		
P2261	R_2	0.5	12	$\vec{12}$	4.5	Sm^6, $(7\text{-}14Sm)_{tr}$	2	2.5	Cr M, A	+	3.5	6	Cr, M A, C	+						
P2262	R_3	0.5	18	$\vec{18}$	$\hat{6}$	Sm^8, (7-14Sm) ?	1	2	Cr M, A	+	1	9.5	Cr, M A, C	+						
P2263	R_4	0.5	15	$\vec{15}$	4.5	$Sm^{8.5}$, (7-14Sm) ?	1.5	3.5	Cr M, A	+	4	19	Cr, M A, C	+	0.5	1.6	tr	1.5	0	0
P2264	R_5	tr	18	$\vec{18}$	5	Sm^8, $\hat{K}_{tr}$	/	/	/	/	/	/	/	/						

Légende : K = kaolinite
Sm = Smectite
(7-14Sm) interstratifié K-Sm
^ = pic asymétrique
→ = déplacement à l'E.G.
tr = traces
Q = quartz
Cr = Crsitobalite
Fp = feldspaths
M = magnétite
Il = Ilménite
A = Augite
C = Calcite

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

Quantification sans facteurs correctifs.

II. LA PLAINE DE L'IMBO CENTRE.

NUMERO	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Illite	Kaol	Halloy	Smect (10-14Å)	Al17 (10-14V)	Chlo.	Talc
II.1.a RN5								
9352	Imbo-Centre N°1 1,00-1,20m	34,5	9,0	0,0	26,9	8,6	19,3	0,0	1,7	0,0
9353	Imbo-Centre N°1 1,20-1,40m	33,1	6,3	0,0	45,1	4,6	6,3	4,6	0,0	0,0
II.1.b RN5										
10259	Zone Gihanga, RN5, 101	39,2	12,7	0,0	16,6	12,7	18,8	0,0	0,0	0,0
10264	Zone Gihanga, RN5, 102	38,8	13,8	0,0	22,4	3,9	21,1	0,0	0,0	0,0
10265	Zone Gihanga, RN5, 103	36,0	12,7	0,0	23,3	6,3	21,7	0,0	0,0	0,0
10266	Zone Gihanga, RN5, 104	35,4	10,5	0,0	33,7	5,5	14,9	0,0	0,0	0,0
10267	Zone Gihanga, RN5, 105	34,3	11,3	0,0	32,8	5,4	16,2	0,0	0,0	0,0
10260	Zone Gihanga, RN5, 106	32,8	13,0	0,0	31,3	3,6	19,3	0,0	0,0	0,0
10268	Zone Gihanga, RN5, 107	28,0	13,7	0,0	34,7	9,9	14,8	0,0	0,0	0,0
10269	Zone Gihanga, RN5, 108	24,9	14,0	0,0	42,0	7,6	11,5	0,0	0,0	0,0
10270	Zone Gihanga, RN5, 109	28,3	13,9	0,0	37,7	6,3	13,9	0,0	0,0	0,0
10271	Zone Gihanga, RN5, 110	19,0	13,9	0,0	53,2	9,3	4,6	0,0	0,0	0,0
10261	Zone Gihanga, RN5, 111	21,2	16,3	0,0	48,6	5,8	8,2	0,0	0,0	0,0
10272	Zone Gihanga, RN5, 112	19,9	14,4	0,0	47,2	8,3	10,2	0,0	0,0	0,0
10273	Zone Gihanga, RN5, 113	17,9	16,9	0,0	48,2	7,6	9,3	0,0	0,0	0,0
10274	Zone Gihanga, RN5, 114	18,3	15,2	0,0	44,6	8,0	7,6	0,0	0,0	6,2
10275	Zone Gihanga, RN5, 115	18,4	17,6	0,0	50,8	4,9	8,2	0,0	0,0	0,0
10276	Zone Gihanga, RN5, 116	14,8	14,3	0,0	61,5	3,8	5,5	0,0	0,0	0,0
10262	Zone Gihanga, RN5, 117 F	16,2	15,8	0,0	56,5	5,2	6,2	0,0	0,0	0,0
II.2.a IMBO CENTRE										
9354	Imbo-Centre N°2 0,80-1,00m	33,5	15,7	0,0	33,5	8,3	9,1	0,0	0,0	0,0
II.2.b Puits NINGA										
10253	Gihanga Ninga puits 2N 201	27,7	16,7	0,0	32,5	6,8	16,3	0,0	0,0	0,0
10741	Gihanga Ninga puits 2N 202	34,0	12,9	0,0	40,8	6,8	5,4	0,0	0,0	0,0
10742	Gihanga Ninga puits 2N 203	26,8	13,0	0,0	36,9	10,2	13,1	0,0	0,0	0,0
10743	Gihanga Ninga puits 2N 204	26,9	12,4	0,0	35,1	11,8	13,7	0,0	0,0	0,0
10744	Gihanga Ninga puits 2N 205	34,4	13,0	0,0	38,5	7,8	6,3	0,0	0,0	0,0
10254	Gihanga Ninga puits 2N 206	34,4	16,9	0,0	23,1	8,1	17,5	0,0	0,0	0,0
10745	Gihanga Ninga puits 2N 207	28,7	9,7	0,0	38,8	10,5	12,2	0,0	0,0	0,0
10746	Gihanga Ninga puits 2N 208	25,2	11,0	0,0	41,8	7,7	11,7	0,0	0,0	2,6
10747	Gihanga Ninga puits 2N 209	24,7	8,6	0,0	44,8	12,5	9,4	0,0	0,0	0,0
10255	Gihanga Ninga puits 2N 210	24,4	13,7	0,0	34,7	10,0	17,2	0,0	0,0	0,0
10748	Gihanga Ninga puits 2N 211	18,3	9,3	0,0	54,5	6,7	11,2	0,0	0,0	0,0
II.3.a IMBO CENTRE										
9355	Imbo-Centre N°3 1,00-1,20m	34,0	17,6	0,0	31,1	6,3	10,9	0,0	0,0	0,0
9356	????????????	25,3	18,3	0,0	41,9	8,3	6,2	0,0	0,0	0,0
II.3.b PUITS NYESHANGA										
10256	Gihanga Nyeshanga puits NY 301	22,1	25,4	0,0	40,2	4,2	8,1	0,0	0,0	0,0
10749	Gihanga Nyeshanga puits NY 302	22,5	23,5	0,0	36,3	7,2	10,6	0,0	0,0	0,0
10750	Gihanga Nyeshanga puits NY 303	22,1	22,8	0,0	38,2	5,7	11,3	0,0	0,0	0,0
10751	Gihanga Nyeshanga puits NY 304	22,3	20,6	0,0	44,0	6,6	6,4	0,0	0,0	0,0
10752	Gihanga Nyeshanga puits NY 305	21,9	21,9	0,0	42,0	6,8	7,4	0,0	0,0	0,0
10257	Gihanga Nyeshanga puits NY 306	20,9	28,1	0,0	37,1	6,8	7,2	0,0	0,0	0,0
10753	Gihanga Nyeshanga puits NY 307	21,2	23,8	0,0	42,2	7,6	5,2	0,0	0,0	0,0
10754	Gihanga Nyeshanga puits NY 308	13,9	31,4	0,0	45,2	3,5	6,0	0,0	0,0	0,0
10755	Gihanga Nyeshanga puits NY 309	16,9	29,2	0,0	42,5	4,3	7,1	0,0	0,0	0,0
10258	Gihanga Nyeshanga puits NY 310	20,6	37,3	0,0	27,9	4,5	9,7	0,0	0,0	0,0
10756	Gihanga Nyeshanga puits NY 311	14,9	39,4	0,0	33,2	5,2	7,4	0,0	0,0	0,0

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

Quantification sans facteurs correctifs.

III. BUJUMBURA

NUMERO	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Illite	Kaol	Hallo7	Smect (10-14Å)	Al17 (10-14Å)	Chlo.		Talc
III.1.a QUARTIER KAMENGE									
9371	Kamenge B2, 1.6m	32,4	25,1	0,0	24,0	8,1	10,4	0,0	0,0
9372	Kamenge C3 ouest, 2m	29,0	28,3	0,0	25,2	7,7	8,0	0,0	0,0
9373	Kamenge C3 est, 2m	25,1	20,4	0,0	36,2	9,0	9,3	0,0	0,0
9374	Kamenge B8 ouest, 1.2m	30,2	18,9	0,0	34,7	8,6	7,6	0,0	0,0
9375	Kamenge D2 ouest, 0.0-0.12m	28,5	18,4	0,0	35,9	9,7	7,4	0,0	0,0
III.1.b KAMENGE: PUITS PHARMACIE									
10734	Puits Pharmacie H 10	22,6	28,2	0,0	32,8	6,5	10,0	0,0	0,0
10250	Puits Pharmacie H 11	26,9	28,9	0,0	25,3	8,0	10,9	0,0	0,0
10735	Puits Pharmacie H 12	35,9	26,8	0,0	23,0	3,8	7,2	3,3	0,0
10736	Puits Pharmacie H 13	28,7	32,5	0,0	21,2	6,0	11,6	0,0	0,0
10737	Puits Pharmacie H 14	26,7	33,6	0,0	28,1	4,2	7,5	0,0	0,0
10251	Puits Pharmacie H 15	30,9	34,0	0,0	21,9	1,9	11,4	0,0	0,0
10738	Puits Pharmacie H 16	25,7	21,8	0,0	34,3	6,6	11,6	0,0	0,0
10739	Puits Pharmacie H 17	23,8	21,1	0,0	39,1	6,6	9,4	0,0	0,0
10740	Puits Pharmacie H 18	24,6	20,1	0,0	39,9	5,1	10,2	0,0	0,0
10252	Puits Pharmacie H 19	28,9	26,2	0,0	26,6	6,6	11,7	0,0	0,0
III.2. QUARTIER KOHERO									
10609	Kohero E1 1m	22,9	22,1	0,0	45,4	4,4	5,2	0,0	0,0
10610	Kohero E2 2m	26,5	22,2	0,0	40,0	3,5	7,8	0,0	0,0
10611	Kohero E3 3m	33,3	33,5	0,0	20,2	4,3	8,8	0,0	0,0
III.3. ZONE KIRIRDO									
9369	Kirindo, INSS, N°16, 0.7-0.8m	20,8	35,1	0,0	25,9	8,1	10,0	0,0	0,0
9370	Kirindo, INSS, N°17, 1.3m	35,2	21,1	0,0	26,4	9,1	8,1	0,0	0,0

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

Quantification sans facteurs correctifs.

B. ENVIRONS DE RUMONGE.

NUMERO	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Illite	Kaol	Halloy	Smect (10-14Sm)	Al17 (10-14V)		Chlo.	Talc
B.I. PUITS 15A									
10220	Bassin Kagoti, puits KaA15, 01	25,9	33,7	0,0	15,2	5,7	11,7	0,0	0,0	7,8
10221	Bassin Kagoti, puits KaA15, 02	19,4	44,7	0,0	8,4	5,5	13,6	0,0	0,0	8,4
10222	Bassin Kagoti, puits KaA15, 03	16,8	43,4	0,0	7,2	14,5	12,8	0,0	0,0	5,3
10223	Bassin Kagoti, puits KaA15, 04	19,7	47,6	0,0	15,4	5,8	11,4	0,0	0,0	0,0
10224	Bassin Kagoti, puits KaA15, 05	13,2	64,8	0,0	13,0	1,9	7,1	0,0	0,0	0,0
10225	Bassin Kagoti, puits KaA15, 06	12,7	60,4	0,0	14,6	4,1	8,2	0,0	0,0	0,0
10226	Bassin Kagoti, puits KaA15, 07	13,4	58,7	0,0	14,9	5,0	8,1	0,0	0,0	0,0
10227	Bassin Kagoti, puits KaA15, 08	13,5	57,4	0,0	15,0	5,9	8,1	0,0	0,0	0,0
10228	Bassin Kagoti, puits KaA15, 09	10,7	68,8	0,0	11,2	3,8	5,4	0,0	0,0	0,0
10229	Bassin Kagoti, puits KaA15, 10	11,5	65,9	0,0	11,9	4,5	6,2	0,0	0,0	0,0
10230	Bassin Kagoti, puits KaA15, 11	13,0	64,3	0,0	12,9	3,9	5,9	0,0	0,0	0,0
10231	Bassin Kagoti, puits KaA15, 12	15,6	58,3	0,0	11,0	5,2	9,9	0,0	0,0	0,0
10232	Bassin Kagoti, puits KaA15, 13	14,6	58,0	0,0	15,6	5,0	6,7	0,0	0,0	0,0
10233	Bassin Kagoti, puits KaA15, 14	14,0	56,0	0,0	18,8	4,8	6,5	0,0	0,0	0,0
10234	Bassin Kagoti, puits KaA15, 15	12,8	58,8	0,0	17,5	4,7	6,2	0,0	0,0	0,0
10235	Bassin Kagoti, puits KaA15, 16	16,4	51,7	0,0	20,5	4,3	7,1	0,0	0,0	0,0
B.II. PUITS 15B									
10698	Bassin Kagoti, puits KaB15, 01	16,9	49,8	0,0	20,4	2,1	10,7	0,0	0,0	0,0
10699	Bassin Kagoti, puits KaB15, 02	14,2	60,4	0,0	15,2	1,9	8,2	0,0	0,0	0,0
10240	Bassin Kagoti, puits KaB15, 03	15,7	56,3	0,0	3,4	12,3	12,3	0,0	0,0	0,0
10700	Bassin Kagoti, puits KaB15, 04	12,6	61,4	0,0	14,6	3,5	7,2	0,0	0,0	0,7
10701	Bassin Kagoti, puits KaB15, 05	13,8	56,8	0,0	18,8	3,2	7,4	0,0	0,0	0,0
10702	Bassin Kagoti, puits KaB15, 06	12,6	63,3	0,0	14,0	2,4	7,8	0,0	0,0	0,0
10703	Bassin Kagoti, puits KaB15, 07	12,7	61,2	0,0	15,3	3,7	7,1	0,0	0,0	0,0
10704	Bassin Kagoti, puits KaB15, 08	13,1	58,8	0,0	16,4	5,5	6,1	0,0	0,0	0,0
10241	Bassin Kagoti, puits KaB15, 09	17,0	56,6	0,0	9,7	2,6	11,1	3,0	0,0	0,0
10705	Bassin Kagoti, puits KaB15, 10	14,0	62,1	0,0	14,4	2,7	6,8	0,0	0,0	0,0
10706	Bassin Kagoti, puits KaB15, 11	15,0	57,9	0,0	14,9	3,8	7,9	0,0	0,0	0,5
10707	Bassin Kagoti, puits KaB15, 12	12,3	63,6	0,0	12,4	4,2	7,5	0,0	0,0	0,0
10708	Bassin Kagoti, puits KaB15, 13	23,8	37,6	0,0	23,6	6,4	8,6	0,0	0,0	0,0
10709	Bassin Kagoti, puits KaB15, 14	14,1	59,3	0,0	15,4	4,7	6,5	0,0	0,0	0,0
10242	Bassin Kagoti, puits KaB15, 15	16,8	56,8	0,0	13,6	4,5	8,2	0,0	0,0	0,0
B.III. BASSIN KAGOTI									
9368	Bassin Kagoti puits 15, 1.0-1.2m	16,6	55,2	0,0	12,7	4,6	10,8	0,0	0,0	0,0

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

Quantification sans facteurs correctifs.

C. ENVIRONS DE NYANZA-LAC

NUMERO	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Illite	Kaol	Halloy	Smect (10-14Sm)	Alt7 (10-14V)	Chlo.	Talc
C.I. VALLEE DE LA RWABA								
C.I.1 PUITS 11								
9364	Rwaba puits 11, 1.00-1.20m	41,5	27,0	0,0	11,3	3,4	8,1	0,0	0,0	8,6
10719	Rwaba puits 11 RW1101	37,3	28,6	0,0	18,4	2,4	9,0	0,0	0,0	4,2
10243	Rwaba puits 11 RW1102	26,5	42,4	0,0	8,6	10,2	12,2	0,0	0,0	0,0
10720	Rwaba puits 11 RW1103	28,7	34,9	0,0	21,8	4,1	7,4	0,0	0,0	3,1
10721	Rwaba puits 11 RW1104	28,3	35,5	0,0	22,7	5,4	8,1	0,0	0,0	0,0
10722	Rwaba puits 11 RW1105	34,3	28,9	0,0	24,1	2,0	10,7	0,0	0,0	0,0
10723	Rwaba puits 11 RW1106	24,0	34,3	0,0	25,4	5,7	7,5	0,0	0,0	3,1
10244	Rwaba puits 11 RW1107	25,5	27,7	0,0	14,8	14,8	11,4	0,0	0,0	5,8
10724	Rwaba puits 11 RW1108	18,8	39,2	0,0	24,0	6,7	7,0	0,0	0,0	4,4
10725	Rwaba puits 11 RW1109	19,1	41,0	0,0	27,0	5,9	5,3	0,0	0,0	1,8
C.I.2 PUITS 12										
9365	Rwaba puits 12, 1.00-1.20m	32,0	31,5	0,0	11,6	5,1	13,0	0,0	0,0	6,7
C.I.3 PUITS 13										
9366	Rwaba puits 13, 1.20m	30,7	24,3	0,0	19,4	7,1	10,6	0,0	0,0	7,3
10245	Rwaba puits 13 RW1301	28,1	36,6	0,0	10,4	6,6	11,9	0,0	0,0	6,4
10710	Rwaba puits 13 RW1302	37,4	30,9	0,0	19,4	3,1	9,1	0,0	0,0	0,0
10711	Rwaba puits 13 RW1303	34,7	34,5	0,0	20,8	3,0	7,1	0,0	0,0	0,0
10712	Rwaba puits 13 RW1304	27,1	39,5	0,0	19,4	4,9	9,0	0,0	0,0	0,0
10713	Rwaba puits 13 RW1305	26,2	36,6	0,0	23,7	4,2	9,3	0,0	0,0	0,0
10714	Rwaba puits 13 RW1306	24,9	34,9	0,0	23,7	8,1	8,4	0,0	0,0	0,0
10715	Rwaba puits 13 RW1307	22,3	34,7	0,0	28,4	8,5	6,1	0,0	0,0	0,0
10246	Rwaba puits 13 RW1308	19,4	28,3	0,0	17,1	19,9	8,2	0,0	0,0	7,1
10716	Rwaba puits 13 RW1309	17,0	45,1	0,0	24,7	7,9	5,3	0,0	0,0	0,0
10717	Rwaba puits 13 RW1310	26,8	31,0	0,0	27,7	6,6	7,0	0,0	0,0	0,9
10718	Rwaba puits 13 RW1311	19,1	37,3	0,0	27,6	8,5	7,6	0,0	0,0	0,0
C.2. VALLEE DE LA GIFURUZI										
9367	Gifuruzi puits 14, 1.10-1.30m	7,0	16,8	0,0	51,3	7,7	9,5	0,0	0,0	7,7
10247	Gifuruzi G14 01	3,8	24,2	0,0	50,3	0,0	16,6	0,0	0,0	5,1
10726	Gifuruzi G14 02	6,7	28,7	0,0	54,9	0,0	8,1	0,0	0,0	1,5
10727	Gifuruzi G14 03	9,3	27,8	0,0	48,6	4,9	9,5	0,0	0,0	0,0
10728	Gifuruzi G14 04	7,6	27,3	0,0	50,7	3,9	8,1	0,0	0,0	2,3
10729	Gifuruzi G14 05	6,1	39,7	0,0	40,5	5,0	8,7	0,0	0,0	0,0
10248	Gifuruzi G14 06	4,5	33,2	0,0	40,4	0,0	13,4	0,0	0,0	8,6
10730	Gifuruzi G14 07	5,6	38,6	0,0	43,1	4,1	8,6	0,0	0,0	0,0
10731	Gifuruzi G14 08	7,6	29,7	0,0	48,3	5,8	8,7	0,0	0,0	0,0
10732	Gifuruzi G14 09	5,4	27,4	0,0	55,6	3,6	8,1	0,0	0,0	0,0
10733	Gifuruzi G14 10	5,2	22,5	0,0	60,9	4,4	7,0	0,0	0,0	0,0
10249	Gifuruzi G14 11	2,9	24,9	0,0	66,7	0,0	5,5	0,0	0,0	0,0

Annexe III.5: Autres paramètres calculés sur diffractogrammes d'A.O.

Outre la position exacte de l'apex de la réflexion principale (OO1), d'autres mesures qui permettent une bonne caractérisation des minéraux smectitiques, ont été faites.

- **Le calcul du paramètre V/P et l'estimation des "classes de cristallinité" des smectites.**

Biscaye, 1965 (repris par Goemaere, 1991) propose de différencier les smectites selon des **"classes de cristallinité"** après glycolage. (Fig. 4). Il distingue trois classes selon la valeur du rapport **V/P**: rapport de la hauteur de la "vallée" (V) sur l'intensité (P: pic) de la réflexion à 17Å des smectites, mesurées depuis l'apex jusqu'au bruit de fond reconstitué.

Les trois classes A, B et C, se caractérisent respectivement par des valeurs positives, nulles et négatives.

Thorez (1976) complète cette classification en codifiant **cinq "classes de cristallinité" (A à E)**, où se combinent les valeurs du rapport V/P de Biscaye et le faciès des réflexions (001) des smectites glycolées. (Fig. 5).

Le rapport V/P est un indice global des composants smectitiques présents dans la phase argileuse: il ne tient pas compte de la nature du minéral smectitique (il intègre aussi bien les minéraux simples que les interstratifiés I/Sm).

La "cristallinité" des smectites, est également appréciée, en A.O., par l'allure des profils diffractométriques (présence ou non de réflexions harmoniques dans l'échantillon glycolé).

- **L'indice de cristallinité (Ic)** des illites, renseigne sur **"l'ouverture"** de ces minéraux vers la smectitisation.

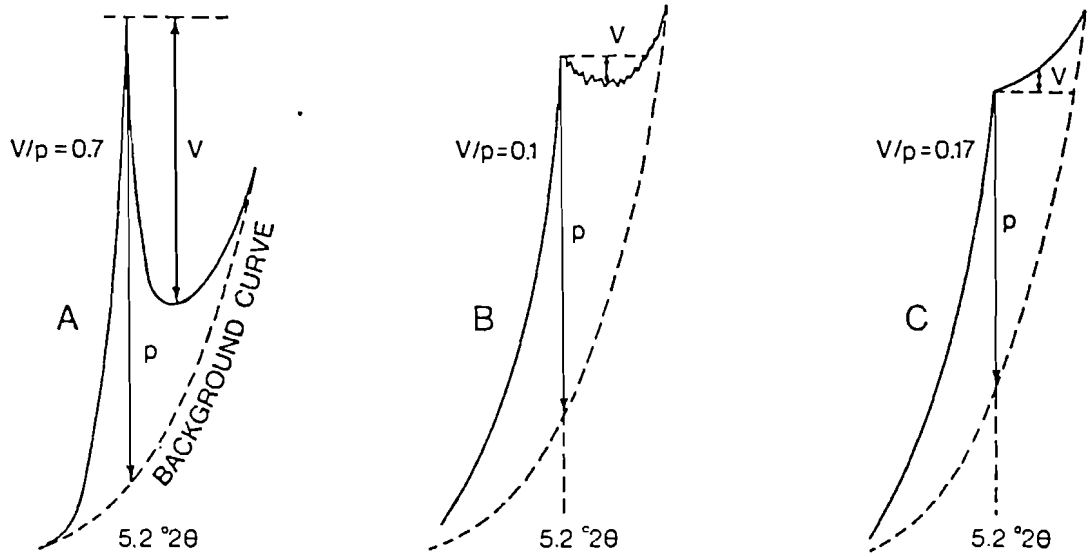
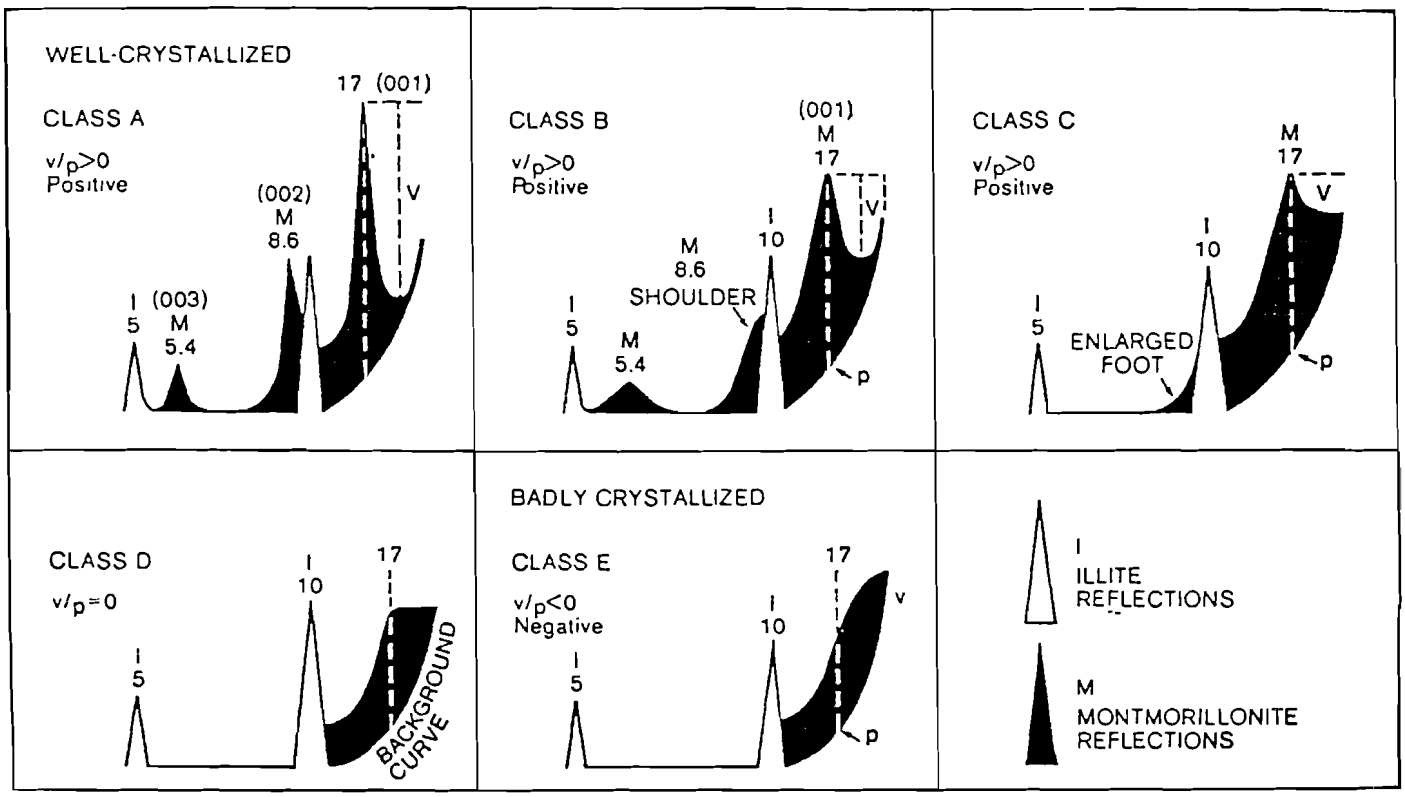


Figure 28 - v/p ratio (« valley »/« peak » height ratio) for the characterization of the « crystallinity » of smectites (after BISCAYE, 1965). The measurement is achieved on the 17Å peak of the glycolated material « p » is measured below the apex of the 17Å reflection, above the background. « v » is measuring the importance of the depression (« valley ») towards the low angle side of the 17Å reflection. (A) : well-crystallized smectite, (B) and (C) : badly-crystallized smectites



CRYSTALLINITY CLASSES OF MONTMORILLONITES

Figure 29 - Empirical « crystallinity » classes of smectitic materials based on : 1) the shape, symmetry, intensity of the 17Å reflection, 2) on the occurrence/absence and shape of the (002) at about 8Å, and (003) at about 5.4Å (THOREZ).

Annexe III.6: Résultats des mesures des paramètres de cristallinité et des intensités des réflexions des A.O. (Tableaux 1 à 5).

I. Plaine de l'IMBO NORD.

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7A	ICEG	V/P	5N	7N	10N	"14N"	10EG	17EG	V	10Q	14Q	17Q
9357	Imbo-Nord, N'4, 0,5m	-	-	---	-	-0,16	-	---	55	100	51	92	-15	73	20	20
9358	Imbo-Nord, N'5, 0,8-1,00m	0,36	4,5	4,1	4,2	0,11	81	160	224	167	208	190	20	268	62	56
9359	Imbo-Nord, N'6, T4, 1,00-1,20m	0,35	4,2	4,5	4,8	0,19	63	165	180	153	166	167	32	216	42	32
9360	Imbo-Nord, N'7, T4, 0,6-0,8m	-	-	23	-	-	-	93	19	(22)	19	-	-	25	32	32
9361	Imbo-Nord, N'8, T4, 0,3-0,5m	-	-	---	-	0,04	-	---	27	174	27	181	9	75	52	54
9362	Imbo-Nord, N'9, T3-T4, 0,6-0,8m	-	-	---	-	0,21	-	---	14	119	14	126	26	40	22	22
9363	Imbo-Nord, N'10, T4, 0,8-1,00m	-	-	---	-	-0,35	-	---	56	157	56	121	-42	95	38	50
11479	Imbo-Nord 3	0,38	4,5	5,2	4,5	0,17	46	332	131	37	122	38	6,5	141	21	3
11480	Imbo-Nord 6	--	--	--	--	0,72	--	0	--	102	5,5	134	96	36,5	9,5	5
11481	Imbo-Nord 7, idem 11480	0,37	--	--	--	0,52	7	0	--	118	19	139	72	85,5	21	13
11482	Imbo-Nord 9, après T4	--	--	--	--	0,17	--	16	--	142	15	162	28	81,5	51	41
11483	Imbo-Nord 15, Lac DOGODOGO	(0.8)	--	--	--	0,18	14,5	4	--	101	18	120	22	79	14	6
11484	Imbo-Nord 19, 20-30cm, canal DOGODOGO	0,38	1,7	--	1,7	0,09	24	24,5	64	27	64	27	2,5	67	12	8
11485	Imbo-Nord 1.1, gravière, Eglise Pantecôte Cibitoke	--	--	--	--	0,73	--	6	--	103	5	182	132	29	11,5	9
11486	Imbo-Nord 1.2, idem 11485, juste en-dessous	--	--	--	--	0,81	--	4,5	--	155	4	248	200	90	14	7
11487	Imbo-Nord 10.1, 150-160cm, T4, dépression DOGODOGO	0,42	--	--	--	0,09	21	18	--	165	50	160	145	160	80	72
11488	Imbo-Nord 10.2, 140-150cm, T4, dépression DOGODOGO	0,45	--	--	--	0,12	25	18	--	163	55	154	18	141	52	39
11489	Imbo-Nord 10.3, 100-120cm, T4, dépression DOGODOGO	0,38	--	--	--	0,00	21	16	--	132	55	134	0	115	37	27
11490	Imbo-Nord 10.4, 80-100cm, T4, dépression DOGODOGO	0,35	--	--	--	-0,16	18	12	--	91	51	112	-18	90	39	41
11491	Imbo-Nord 10.5, 50-80cm, T4, dépression DOGODOGO	0,35	--	--	--	0,13	16	12,5	--	111	46	170	22	97	36	29
11492	Imbo-Nord 10.6, 25-50cm, T4, dépression DOGODOGO	0,47	--	--	--	-0,30	21	18	--	158	45	93	-28	154	70	51
11493	Imbo-Nord 11.1, 0-20cm, T4	--	--	--	--	0,11	--	8	--	105	13	154	17	47	20	12
11494	Imbo-Nord 11.2, 60-80cm, T4	--	--	--	--	0,00	--	8	--	108	10	144	0	49	22	17
11495	Imbo-Nord 11.3, 80-100cm, T4	--	--	--	--	-0,40	--	43	40	95	39	50	-20	68	13	24
11496	Imbo-Nord 12.1, pont RUHWA, RN5	--	--	--	--	0,32	--	21	--	102	5	151	49	31	13	8
11497	Imbo-Nord 12.2, carrière abandonnée RN5	--	--	7,0	--	0,15	--	39	28	34	28	61	9	30,5	8	3
11498	Imbo-Nord 14.1, T3, 140-150cm, RN5	--	--	--	--	0,75	--	0	--	165	6,5	252	190	55	20,5	14
11499	Imbo-Nord 14.2, T3, 120-140cm, RN5	--	--	--	--	0,54	--	2	--	134	5,5	166	89	60,5	23,5	23
11500	Imbo-Nord 14.3, T3, 100-120cm, RN5	--	--	--	--	0,51	--	2	--	118	6	151	77	52	17	16
11501	Imbo-Nord 14.4, T3, 80-100cm, RN5	--	--	--	--	0,72	--	1,5	--	124	5	147	106	50	13	12
11502	Imbo-Nord 14.5, T3, 50-80cm, RN5	0,63	--	--	--	0,45	17	6	--	164	17,5	191	85	99	26	17
11503	Imbo-Nord 14.6, T3, 25-50cm, RN5	--	--	--	--	0,37	--	4,5	--	153	10	199	73	78	13	15
11504	Imbo-Nord 17.1, 100-120cm, T5, source DOGODOGO	0,45	5,0	7,0	5,0	0,07	41,5	54	90,5	115	91,5	138	10	142	52	44
11505	Imbo-Nord 17.2, 80-100cm, T5, source DOGODOGO	0,50	--	7,0	--	0,09	33	65	62	135	66	127	12	156	56	34

LES VERTISOLS DU BURUNDI.
II. LA PLAINE DE L'IMBO CENTRE.

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7Å	ICEG	V/P	5N	7N	10N	"14Å"	10EG	17EG	V	10Q	14Q	17Q
II.1.a	RN5															
9352	Imbo-Centre N°1 1,00-1,20m	0,26	-	---	-	-0,09	27	---	105	134	100	105	-10	138	56	57
9353	Imbo-Centre N°1 1,20-1,40m	0,25	4	---	4,5	-0,28	16	---	63	89	58	86	-24	69	11	10
II.1.b	RN5															
10259	Zone Gihanga, RN5, 101	0,18	-	-	-	-0,36	14	-	78	83	71	30	-11	101	38	35
10264	Zone Gihanga, RN5, 102	-	-	-	-	-0,35	-	-	64	59	59	34	-12	86	35	32
10265	Zone Gihanga, RN5, 103	0,16	-	-	-	-0,19	12	-	77	86	68	44	-8	113	44	41
10266	Zone Gihanga, RN5, 104	-	-	-	-	-0,24	-	-	64	82	64	61	-15	94	28	26
10267	Zone Gihanga, RN5, 105	0,21	-	-	-	-0,12	15	-	70	95	70	67	-8	109	45	35
10268	Zone Gihanga, RN5, 106	0,20	-	-	-	0,07	17	-	86	135	86	82	6	132	46	40
10268	Zone Gihanga, RN5, 107	0,24	-	-	-	0,17	21	-	87	142	76	94	16	133	48	40
10269	Zone Gihanga, RN5, 108	0,25	-	-	-	0,31	26	-	105	193	98	165	51	161	52	47
10270	Zone Gihanga, RN5, 109	0,24	-	-	-	0,35	23	-	95	167	94	125	44	165	52	46
10271	Zone Gihanga, RN5, 110	-	-	5,8	-	0,52	-	67	52	129	45	126	66	88	19	12
10261	Zone Gihanga, RN5, 111	0,22	-	5,5	-	0,53	11	67	49	120	44	101	54	91	24	17
10272	Zone Gihanga, RN5, 112	0,19	-	5	-	0,47	9	62	48	115	43	102	48	82	25	22
10273	Zone Gihanga, RN5, 113	-	-	5,3	-	0,60	-	99	61	154	54	145	87	121	34	29
10274	Zone Gihanga, RN5, 114	-	-	5,8	-	0,57	-	67	48	116	41	100	57	86	22	17
10275	Zone Gihanga, RN5, 115	-	-	4,9	-	0,69	-	85	50	141	45	124	86	98	24	19
10276	Zone Gihanga, RN5, 116	0,29	-	4,6	-	0,69	8	65	27	93	27	112	77	63	15	10,5
10262	Zone Gihanga, RN5, 117 F	0,29	-	4,6	-	0,74	12	93	43	98	39	136	101	84	17	14
II.2.a	IMBO CENTRE															
9354	Imbo-Centre N°2 0,80-1,00m	0,25	-	5,2	5,9	0,00	22	44	87	98	77	109	0	114	22	21
II.2.b	Puits NINGA															
10260	Gihanga Ninga puits 2N 201	0,22	-	5,1	-	0,07	17	89	77	98	73	86	6	118	45	44
10741	Gihanga Ninga puits 2N 202	0,24	?	4,5	11,5	-0,22	11,5	19	47	50	50	60	-13	50	9	8
10742	Gihanga Ninga puits 2N 203	0,19	?	5,75	?	-0,10	15,0	33	79	79	68	93	-9	96	33	34
10743	Gihanga Ninga puits 2N 204	0,24	?	5,75	?	-0,13	23,0	40	97	106	86,5	113	-15	119	44	44
10744	Gihanga Ninga puits 2N 205	0,23	?	5,50	6,5	-0,27	17,0	25	73	57	66	74	-20	73	17	12
10254	Gihanga Ninga puits 2N 206	-	-	4,8	-	-0,34	-	66	58	71	55	37	-13	81	29	28
10745	Gihanga Ninga puits 2N 207	0,17	?	5,00	?	-0,23	12,5	23	75	74	68	92	-21	85	29	29
10746	Gihanga Ninga puits 2N 208	0,19	?	4,40	?	-0,08	18,0	38,5	96	97	88	146	-12	114	42	42
10747	Gihanga Ninga puits 2N 209	0,20	?	5,00	?	-0,26	11,0	16,5	55	60	47,5	86	-22	60	24	18
10255	Gihanga Ninga puits 2N 210	0,21	-	5	-	0,37	17	80	82	158	71	101	37	130	51	50
10748	Gihanga Ninga puits 2N 211	0,20	?	5,00	8,5	0,39	10,0	25	50	111	49	146	57	77	30	30
II.3.a	IMBO CENTRE															
9355	Imbo-Centre N°3 1,00-1,20m	0,26	-	5,3	7,1	0,10	24	50	89	100	81	115	12	115	25	25
9356	???????????	0,30	-	4,9	8,8	0,09	21	50	70	116	61	115	10	94	21	15
II.3.b	PUITS NYESHANGA															
10256	Gihanga Nyeshanga puits NY 301	0,33	-	6,5	-	0,56	27	182	82	155	79	144	81	131	35	29
10749	Gihanga Nyeshanga puits NY 302	0,25	?	5,50	9	0,39	38,0	141	155	173	135	218	85	240	68	64
10750	Gihanga Nyeshanga puits NY 303	0,28	?	5,75	9,75	0,48	22,0	80,5	79	114	78	135	65	128	35	40
10751	Gihanga Nyeshanga puits NY 304	0,22	?	5,25	7,75	0,30	26,0	93	116	142	101	199	60	153	34	29
10752	Gihanga Nyeshanga puits NY 305	0,25	?	6,00	8	0,43	20,0	74	80	115	74	142	61	113	30	25
10257	Gihanga Nyeshanga puits NY 306	-	-	4,5	-	0,61	-	135	64	124	58	103	63	106	28	21
10753	Gihanga Nyeshanga puits NY 307	0,22	6,75	4,25	5,25	0,37	26,0	110	116	119	98	195	72	125	26	24
10754	Gihanga Nyeshanga puits NY 308	0,36	?	5,00	9,5	0,57	37,5	205	105	251	91	295	167	188	48	39
10755	Gihanga Nyeshanga puits NY 309	0,33	?	5,75	8,5	0,68	31,0	149	94	186	86,5	217	147	166	44	36
10258	Gihanga Nyeshanga puits NY 310	0,31	-	4,5	-	0,56	23	186	73	116	68	92	52	123	39	32
10756	Gihanga Nyeshanga puits NY 311	0,37	?	6,25	10,5	0,49	36,0	228	97	171	86	192	94	152	50	43

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

III. BUJUMBURA

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7Å	IC8G	V/P	5N	7N	10N	°14N°	10BG	17BG	V	10Q	14Q	17Q
III.1.a	QUARTIER KAMENGE															
9371	Kamenge B2, 1.6m	0,27	8,8	7,9	6,4	0,08	40	119	152	132	124	146	12	220	45	40
9372	Kamenge C3 ouest, 2m	0,19	-	4,2	6,1	0,14	17	93	91	95	83	114	16	130	24	23
9373	Kamenge C3 est, 2m	0,24	-	6,9	7,2	0,23	33	109	137	201	111	196	45	212	44	41
9374	Kamenge E8 ouest, 1.2m	0,21	10	5,7	7,5	0,23	27	88	130	163	116	165	38	197	34	30
9375	Kamenge D2 ouest, 0.0-0.12m	0,22	8,3	5,2	7,1	0,27	38	118	177	222	147	232	62	270	40	38
III.1.b	KAMENGE: PUITS PHARMACIE															
10734	Puits Pharmacie H 10	0,22	?	9,25	12,25	0,46	24,5	130	113	137	104	151	69	200	54	49
10250	Puits Pharmacie H 11	0,17	-	5	-	0,27	20	74	120	153	104	98	26	187	51	42
10735	Puits Pharmacie H 12	0,29	6,5	4,25	6,25	-0,25	24,0	56	83	45	75	48	-12	96	19	15
10736	Puits Pharmacie H 13	0,21	?	7,25	(14)	0,06	35,0	163	168	109	144	106	6	232	60	53
10737	Puits Pharmacie H 14	0,19	?	9,75	13	0,22	28,0	170	148	120	135	142	31	224	64	58
10251	Puits Pharmacie H 15	0,23	-	5,6	-	0,41	23	102	100	124	100	71	29	180	47	37
10738	Puits Pharmacie H 16	0,23	?	6,50	9,25	0,43	30,5	99	132	132	117	156	67	217	60	53
10739	Puits Pharmacie H 17	0,24	?	6,50	10,5	0,44	40,5	135	172	215	152	250	110	249	66	60
10740	Puits Pharmacie H 18	0,24	?	5,75	8,25	0,45	37,0	122	153	187	149	242	108	270	68	62
10252	Puits Pharmacie H 19	0,21	-	5	-	0,46	17	95	80	100	74	68	31	139	35	31
III.2.	QUARTIER ROHERO															
10609	Rohero E1 1m	-	-	4,9	-	0,50	-	117	62	110	62	123	62	115,5	18	14
10610	Rohero E2 2m	0,25	-	5	-	0,42	15	101	61	88	61	92	39	114	20	17
10611	Rohero E3 3m	0,23	-	6,1	-	0,05	33	141	143	104	140	85	4	212	47	38
III.3.	ZONE KININDO															
9369	Kinindo, INSS, N°16, 0.7-0.8m	0,29	-	4,2	8	0,31	27	159	94	133	77	131	41	157	40	36
9370	Kinindo, INSS, N°17, 1.3m	0,27	9	3,9	5,9	0,14	37	90	138	132	135	153	22	231	35	32

VERTICOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

B ENVIRONS DE RUMONGE

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7A	IC8G	V/P	5N	7N	10N "14N"	10BG	17BG	V	10Q	14Q	17Q
B.I. PUITS 15A															
10220	Bassin Kagoti, puits KaA15, 01	0,19	-	5,9	-	-0,22	16	95	84	63	73	43	-9	97	36	33
10221	Bassin Kagoti, puits KaA15, 02	0,24	-	5,6	-	-0,25	17	122	72	59	53	23	-6	85	35	38
10222	Bassin Kagoti, puits KaA15, 03	-	-	5,5	-	0,08	-	133	69	67	51	22	2	87	38	39
10223	Bassin Kagoti, puits KaA15, 04	0,23	-	5,9	-	0,09	22	188	97	93	78	61	5	120	45	45
10224	Bassin Kagoti, puits KaA15, 05	0,44	-	5,8	-	0,44	54	196	123	173	100	98	43	195	63	54
10225	Bassin Kagoti, puits KaA15, 06	0,41	-	5,1	-	0,36	50	190	121	186	100	115	41	194	74	65
10226	Bassin Kagoti, puits KaA15, 07	-	-	6,1	-	0,28	-	189	49	78	43	48	13	85	31	22
10227	Bassin Kagoti, puits KaA15, 08	0,27	-	5,4	-	0,32	23	116	86	122	66	76	24	130	47	42
10228	Bassin Kagoti, puits KaA15, 09	0,55	-	5,1	-	0,43	61	245	110	151	95	100	43	183	60	48
10229	Bassin Kagoti, puits KaA15, 10	0,53	-	5,2	-	0,32	64	239	121	151	104	108	35	199	67	57
10230	Bassin Kagoti, puits KaA15, 11	0,51	-	5,2	-	0,29	56	202	110	147	102	101	29	173	56	46
10231	Bassin Kagoti, puits KaA15, 12	0,52	-	5,2	-	0,31	41	108	78	102	72	51	16	133	48	46
10232	Bassin Kagoti, puits KaA15, 13	0,55	-	5	-	0,32	53	138,5	96	124	87	93	30	159	49	41
10233	Bassin Kagoti, puits KaA15, 14	0,54	-	5	-	0,35	60	160	111	158	99	133	47	177	53	46
10234	Bassin Kagoti, puits KaA15, 15	0,37	-	5	-	0,55	38	156	103	113	85	116	64	158	50	42
10235	Bassin Kagoti, puits KaA15, 16	0,65	-	5	-	0,47	47	219	72	115	69,5	87	41	126	34	34
B.II. PUITS 15B															
10698	Bassin Kagoti, puits KaB15, 01	0,29	?	7,25	?	0,10	29,0	256	102	120	87	105	11	131	60	55
10699	Bassin Kagoti, puits KaB15, 02	0,46	?	6,25	?	0,12	35,5	310	77	85	73	78	9	112	47	42
10240	Bassin Kagoti, puits KaB15, 03	0,32	-	6,2	-	-0,11	24	131	75	91	73	16	-2	130	61	58
10700	Bassin Kagoti, puits KaB15, 04	0,43	?	6,50	?	0,21	37,0	365	86	112	75	87	18	139	52	43
10701	Bassin Kagoti, puits KaB15, 05	0,34	?	6,75	?	0,07	28,5	305	84	126	74	101	7	115	47	40
10702	Bassin Kagoti, puits KaB15, 06	0,43	?	6,25	?	0,19	37,0	367	86	111	73	81	15	130	51	45
10702	Bassin Kagoti, puits KaB15, 07	0,40	?	6,00	?	0,20	43,0	425	108	135	88	106	21	160	57	49
10704	Bassin Kagoti, puits KaB15, 08	0,39	?	5,75	?	0,24	46,0	440	118	155	98	123	30	167	58	46
10241	Bassin Kagoti, puits KaB15, 09	0,30	-	6	-	0,00	27	143	90	122	86	49	0	136	63	55
10705	Bassin Kagoti, puits KaB15, 10	0,29	?	5,25	?	0,27	31,5	418	107	86	94	97	26	159	55	46
10706	Bassin Kagoti, puits KaB15, 11	0,23	?	5,25	?	0,20	37,0	520	161	120	135	134	27	195	76	71
10707	Bassin Kagoti, puits KaB15, 12	0,38	?	5,25	?	0,37	39,5	457	105	99	88	89	33	163	62	54
10708	Bassin Kagoti, puits KaB15, 13	0,30	?	5,50	?	0,17	37,5	175	126	104	111	110	19	167	47	40
10709	Bassin Kagoti, puits KaB15, 14	0,25	?	5,75	10,75	0,09	50,0	620	201	136	148	161	14	212	81	68
10242	Bassin Kagoti, puits KaB15, 15	0,35	-	3,8	-	-0,14	22	184	62	74	59	48	-7	82	30	29
B.III. BASSIN KAGOTI															
9368	Bassin Kagoti puits 15, 1.0-1.2m	-	-	6,4	-	-0,27	-	143	49	61	43	70	-19	59	34	29

VERTISOLS ET SOLS VERTIQUES DU BURUNDI.

C. ENVIRONS DE NYANZA-LAC

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7A	IC6G	V/P	5N	7N	10N	"14N"	10EG	17EG	V	10Q	14Q	17Q
C.I. VALLEE DE LA RWABA																
C.I.1 PUITS 11																
9364	Rwaba puits 11, 1.00-1.20m	0,17	7,3	8,8	5,8	-0,18	29	110	169	79	169	92	-17	235	36	33
10719	Rwaba puits 11 RW1101	0,13	9,5	8,00	7,25	-0,11	15,0	95	115	51	124	61	-7	202	34	30
10243	Rwaba puits 11 RW1102	-	-	10	-	0,00	-	104	65	86	65	21	0	175	33	30
10720	Rwaba puits 11 RW1103	0,14	?	9,50	10,5	0,15	18,0	170	125	97	140	106	16	226	44	36
10721	Rwaba puits 11 RW1104	0,14	?	9,25	10	0,24	17,0	166	118	114	132	106	25	229	44	38
10722	Rwaba puits 11 RW1105	0,15	11	9,00	6,75	0,01	27,0	175	181	110	208	146	0	316	65	65
10723	Rwaba puits 11 RW1106	0,14	?	9,25	10	0,25	16,0	174	114	118	122	129	32	210	41	35
10244	Rwaba puits 11 RW1107	0,25	-	8,5	-	-0,14	21	90	83	120	83	48	-7	173	31	38
10724	Rwaba puits 11 RW1108	0,21	?	9,00	?	0,34	22,0	258	107	174	124	158	53	301	60	46
10725	Rwaba puits 11 RW1109	0,15	?	9,00	?	0,34	9,0	140	60	91	65	92	31	105	22	18
C.I.2 PUITS 12																
9365	Rwaba puits 12, 1.00-1.20m	0,18	-	9,3	10	-0,13	26	141	143	110	143	116	-15	238	56	57
C.I.3 PUITS 13																
9366	Rwaba puits 13, 1.20m	0,16	-	10	9	-0,05	28	147	174	150	174	144	-7	350	62	60
10245	Rwaba puits 13 RW1301	0,16	-	10,1	-	0,10	21	173	132	128	132	49	5	330	56	56
10710	Rwaba puits 13 RW1302	0,08	11,5	9,50	8,25	-0,07	10,0	108	123	66	131	68	-5	198	36	32
10711	Rwaba puits 13 RW1303	0,10	14,5	9,75	8,5	0,01	14,0	151	141	82	152	91	0	214	38	31
10712	Rwaba puits 13 RW1304	0,12	?	9,50	11,75	0,06	17,5	236	144	119	162	116	7	256	56	54
10713	Rwaba puits 13 RW1305	0,05	?	10,00	12,25	0,15	5,0	130	94	75	93	84	13	154	41	33
10714	Rwaba puits 13 RW1306	0,11	?	9,00	15	0,29	9,0	112	81	83	80	76	22	154	30	27
10715	Rwaba puits 13 RW1307	0,13	?	9,50	?	0,28	10,0	126	78	107	81	103	29	164	29	22
10246	Rwaba puits 13 RW1308	0,18	-	9	-	0,25	14	111	76	128	76	67	17	219	36	34
10716	Rwaba puits 13 RW1309	0,15	?	9,75	?	0,42	12,0	188	79	130	71	103	43	131	24	22
10717	Rwaba puits 13 RW1310	0,13	?	9,00	8,5	0,26	18,0	168	136	141	145	150	39	227	40	35
10718	Rwaba puits 13 RW1311	0,15	?	10,25	?	0,30	10,0	123	65	100	63	91	27	139	29	25
C.2. VALLEE DE LA GIFURUZI																
9367	Gifuruzi puits 14, 1.10-1.30m	-	-	9,5	-	0,54	-	57	19	166	19	168	90	81	32	26
10247	Gifuruzi G14 01	-	-	8,9	-	0,70	-	37	6	108	6	73	55	44	18,5	14
10726	Gifuruzi G14 02	0,36	?	9,25	?	0,61	10,5	92	29	186	21,5	176	109	88	30	26
10727	Gifuruzi G14 03	0,17	?	8,75	?	0,75	7,0	120	42	181	40	210	158	122	50	41
10728	Gifuruzi G14 04	0,39	?	9,50	?	0,67	12,0	111	31	190	31	206	137	113	43	33
10729	Gifuruzi G14 05	0,33	?	8,50	?	0,55	6,0	136	18	117	21	139	76	78	39	30
10248	Gifuruzi G14 06	-	-	9,2	-	0,36	-	98	13	152	13	118	42	73	45	39
10730	Gifuruzi G14 07	0,29	?	8,75	?	0,55	4,0	103	14	110	15	115	63	61	29	23
10731	Gifuruzi G14 08	(0,06)	?	9,50	?	0,48	(1)	51	16	70	13	83	40	34	18	15
10732	Gifuruzi G14 09	0,12	?	8,75	?	0,61	4,0	138	33,5	221	27	280	170	109	50	41
10733	Gifuruzi G14 10	(0,13)	?	9,50	?	0,65	(2)	48	15	120	11	130	84	48	20	15
10249	Gifuruzi G14 11	-	-	8,8	-	0,78	-	139	8	200	8	182	140	102	25	14

Annexe III.7: Les post-traitements des A.O.: saturations cationiques (Li^+; K^+).

Les trois tests en routine (N, EG, Q_{500}), nottamment la solvatation à l'EG, permettent d'identifier un minéral susceptible d'appartenir au groupe des smectites s.s.

Par contre, tout minéral argileux gonflant à 17Å au EG, n'est pas nécessairement une smectite s.s., mais peut correspondre à un interstratifié constitué de feuillets illitiques minoritaires et d'espaces interfoliaires relachés à comportement de smectites (Thorez, 1976).

En outre, certains minéraux argileux partagent les mêmes réflexions harmoniques (001) dans certains états (N; EG; Q_{500}).

Pour le cas des smectites, le recours à des post-traitements permet, d'une part, de préciser l'appartenance aux minéraux simples ou aux interstratifiés. D'autre part, il donne des informations sur les espèces, en particulier dans le cas d'assemblages minéralogiques complexes.

Seuls les post-traitements utilisés dans le cadre de ce travail, sont décrits:

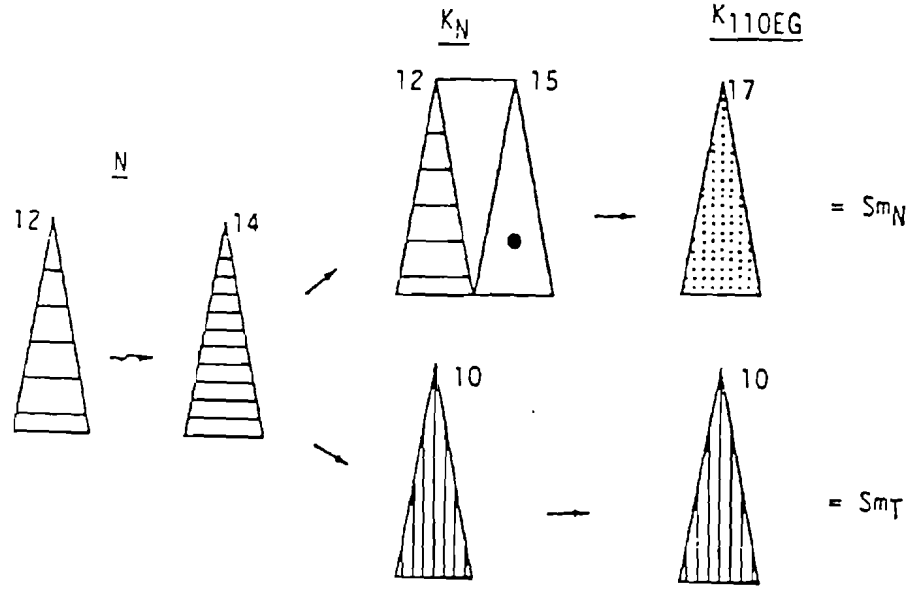


Figure . Differentiation entre Smectite de transformation et Smectite de neoformation par saturation au KCl.

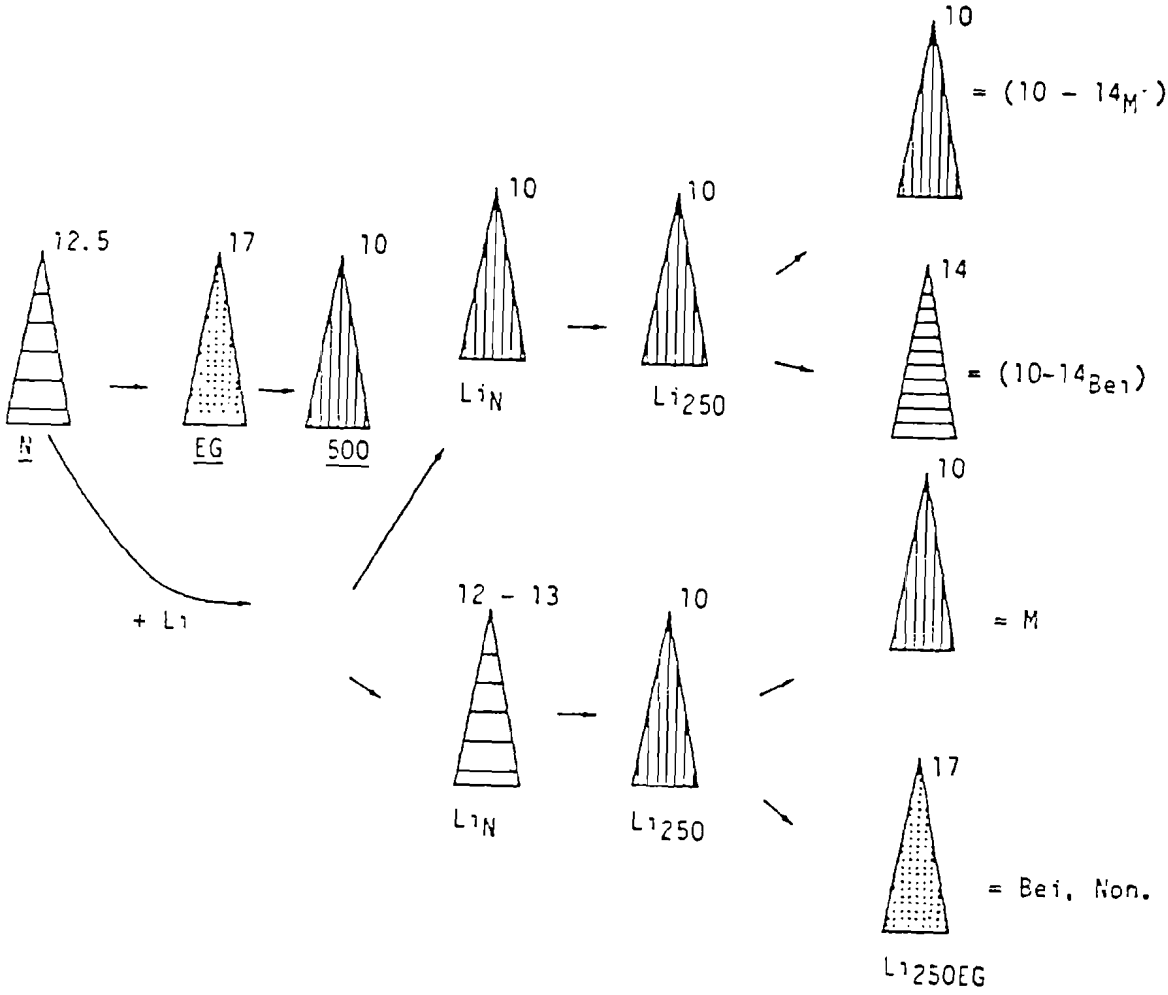


Fig. : Différenciation au LiCl (Test de GREENE KELLY, 1953 modifié) entre les smectites S.S. dioctaèdriques (Montmorillonite, Beidellite) et les interstratifiés (10-14sm) (THOREZ, 1978 in SOMME et al).

1. La saturation au Li+ (solution 1M de LiCl).

Cette saturation implique une série de diffractogrammes couvrant en séquence les traitements:

Li_N - Li_{300} - Li_{300Gl} test de Greene-Kelly (1953), modifié par Thorez (1978)

Cette saturation, préconisée par Greene-Kelly (1953), permet avec le traitement (Li_{300Gl}) de différencier les Montmorillonites *s.s.* (M) des autres représentants du groupe [Beidellite (Bei), Nontronite, Hectorite et Saponite]; les premières possèdent une substitution octaédrique importante et les autres une substitution en site tétraédrique. Contrairement aux autres minéraux du groupe, les montmorillonites voient leur charge octaédrique supprimée par migration de Li^+ dans les cavités octaédriques, et corrélativement la perte des propriétés d'hydratation, de gonflement en présence de polyalcools et la perte de la capacité d'échange (effet Hofmann-Klemen: in Caillère *et al*, 1982).

L'espacement basal des montmorillonites saturées au Li^+ reste bloqué à 10Å après glycérolage.

Thorez (in Sommé *et al*, 1978) a modifié ce test en enregistrant, en plus, les diffractogrammes "Li_N" et "Li_{300}". Ce test permet, sur base des trois diffractogrammes, de distinguer: M, (10-14M), "Bei" et "(10-14Bei)", isolés ou en mélange. Cependant, comme dans le test original de Greene-Kelly ou modifié par Thorez, on ne peut faire la distinction entre Beidellites et Nontronites. Cette saturation est surtout très pratique lorsque les minéraux smectitiques sont en mélange avec d'autres phyllosilicates et où ni analyse chimique, ni poudres désorientées ne sont efficientes dans la diagnose de l'espèce smectitique. Dans des échantillons à phase apparemment monominérale à smectite, le test modifié conduit à des interprétations spécifiques en faisant par exemple, la distinction entre smectite de transformation [Bei et/ou (10-14Bei)] et smectite de néoformation [M ou (10-14M)]; les premières peuvent résulter de processus d'altération atmosphérique ou pédogénétique, les secondes, refléter des processus d'altération halmyrolytiques de matériaux volcaniques.

ENVIRONS DE NYANZA-LAC

Paramètres de cristallinité et intensités des réflexions.

NUMEROS	ORIGINE GEOGRAPHIQUE	Esq	ICN	IC7A	ICEG	V/P	5N	7N	10N	"14N"	10EG	17EG	V	10Q	14Q	17Q
C.I. VALLEE DE LA RWABA																
C.I.1 PUITS 11																
9364	Rwaba puits 11, 1.00-1.20m	0,17	7,3	8,8	5,8	-0,18	29	110	169	79	169	92	-17	235	36	33
10719	Rwaba puits 11 RW1101	0,13	9,5	8,00	7,25	-0,11	15,0	95	115	51	124	61	-7	202	34	30
10243	Rwaba puits 11 RW1102	-	-	10	-	0,00	-	104	65	86	65	21	0	175	33	30
10720	Rwaba puits 11 RW1103	0,14	?	9,50	10,5	0,15	18,0	170	126	97	140	106	16	226	44	36
10721	Rwaba puits 11 RW1104	0,14	?	9,25	10	0,24	17,0	166	118	114	132	106	25	229	44	38
10722	Rwaba puits 11 RW1105	0,15	11	9,00	6,75	0,01	27,0	175	181	110	208	146	0	318	65	65
10723	Rwaba puits 11 RW1106	0,14	?	9,25	10	0,25	16,0	174	114	118	122	129	32	210	41	38
10244	Rwaba puits 11 RW1107	0,25	-	8,5	-	-0,14	21	90	83	120	83	48	-7	173	31	38
10724	Rwaba puits 11 RW1108	0,21	?	9,00	?	0,34	22,0	258	107	174	124	158	53	301	60	46
10725	Rwaba puits 11 RW1109	0,15	?	9,00	?	0,34	9,0	140	60	91	65	92	31	105	22	18
C.I.2 PUITS 12																
9365	Rwaba puits 12, 1.00-1.20m	0,18	-	9,3	10	-0,13	26	141	143	110	143	116	-15	238	56	57
C.I.3 PUITS 13																
9366	Rwaba puits 13, 1.20m	0,16	-	10	9	-0,05	28	147	174	150	174	144	-7	350	62	60
10245	Rwaba puits 13 RW1301	0,16	-	10,1	-	0,10	21	173	132	128	132	49	5	330	56	56
10710	Rwaba puits 13 RW1302	0,08	11,5	9,50	8,25	-0,07	10,0	108	123	66	131	68	-5	198	36	32
10711	Rwaba puits 13 RW1303	0,10	14,5	9,75	8,5	0,01	14,0	151	141	82	152	91	0	214	38	31
10712	Rwaba puits 13 RW1304	0,12	?	9,50	11,75	0,06	17,5	236	144	119	162	116	7	296	66	54
10713	Rwaba puits 13 RW1305	0,05	?	10,00	12,25	0,15	5,0	130	94	75	93	84	13	154	41	33
10714	Rwaba puits 13 RW1306	0,11	?	9,00	15	0,29	9,0	112	81	83	80	76	22	154	30	27
10715	Rwaba puits 13 RW1307	0,13	?	9,50	?	0,28	10,0	126	78	107	81	103	29	164	29	22
10246	Rwaba puits 13 RW1308	0,18	-	9	-	0,25	14	111	76	128	76	67	17	219	36	34
10716	Rwaba puits 13 RW1309	0,15	?	9,75	?	0,42	12,0	188	79	130	71	103	43	131	24	22
10717	Rwaba puits 13 RW1310	0,13	?	9,00	8,5	0,26	18,0	168	136	141	145	150	39	227	40	38
10718	Rwaba puits 13 RW1311	0,15	?	10,25	?	0,30	10,0	123	65	100	63	91	27	130	29	25
C.2. VALLEE DE LA GIFURUZI																
9367	Gifuruzi puits 14, 1.10-1.30m	-	-	9,5	-	0,54	-	57	19	166	19	168	90	81	32	26
10247	Gifuruzi G14 01	-	-	8,9	-	0,70	-	97	6	108	6	79	55	44	18,5	14
10726	Gifuruzi G14 02	0,36	?	9,25	?	0,61	10,5	92	29	186	21,5	176	108	88	30	26
10727	Gifuruzi G14 03	0,17	?	8,75	?	0,75	7,0	120	42	181	40	210	158	132	50	41
10728	Gifuruzi G14 04	0,39	?	9,50	?	0,67	12,0	111	31	190	31	206	137	113	40	33
10729	Gifuruzi G14 05	0,33	?	8,50	?	0,55	6,0	136	18	117	21	139	76	78	39	30
10248	Gifuruzi G14 06	-	-	9,2	-	0,36	-	98	13	152	13	118	42	73	45	39
10730	Gifuruzi G14 07	0,29	?	8,75	?	0,55	4,0	103	14	110	15	115	63	61	29	23
10731	Gifuruzi G14 08	(0,06)	?	9,50	?	0,48	(1)	51	16	70	13	83	40	34	18	15
10732	Gifuruzi G14 09	0,12	?	8,75	?	0,61	4,0	138	33,5	221	27	280	170	109	50	41
10733	Gifuruzi G14 10	(0,13)	?	9,50	?	0,65	(2)	48	15	120	11	130	84	48	20	15
10249	Gifuruzi G14 11	-	-	8,8	-	0,78	-	139	8	200	8	182	142	102	25	14

2. La saturation au K+ (solution 2M de KCL).

Cette saturation implique une série de diffractogrammes couvrant les traitements et enregistrements diffractométriques en séquence:

K_N - K_{105} - K_{105EG}

La saturation au KCl permet de différencier:

- V de C: la vermiculite (V) se tasse définitivement à 10Å après saturation, tandis que la chlorite (C) n'est pas affectée par le traitement et conserve sa réflexion (001) à 14Å;

- V de Sm de néoformation: à K_{105EG}, les smectites de néoformation (SmN) gonflent de 13.2Å à 17Å au K_{105EG} suivant les espèces, tandis que les vermiculites restent bloquées à 10.4Å;

- Sm de transformation (Sm_T) de Sm de néoformation (Sm_N): la Sm_T est bloquée à 10Å après saturation au KCl et ne gonfle plus (K_{105EG}) contrairement à la SmN;

- La saturation K_N permet la reconstitution de la garniture potassique des illites à espaces interfoliaires relâchés (illite ouverte: I_{Sm} et I_V, à l'exception des I_C);

- La saturation permet d'identifier les espaces interfoliaires alumino-hydroxylés des Sm_{Al} et V_{Al} (Kanda, 1987).

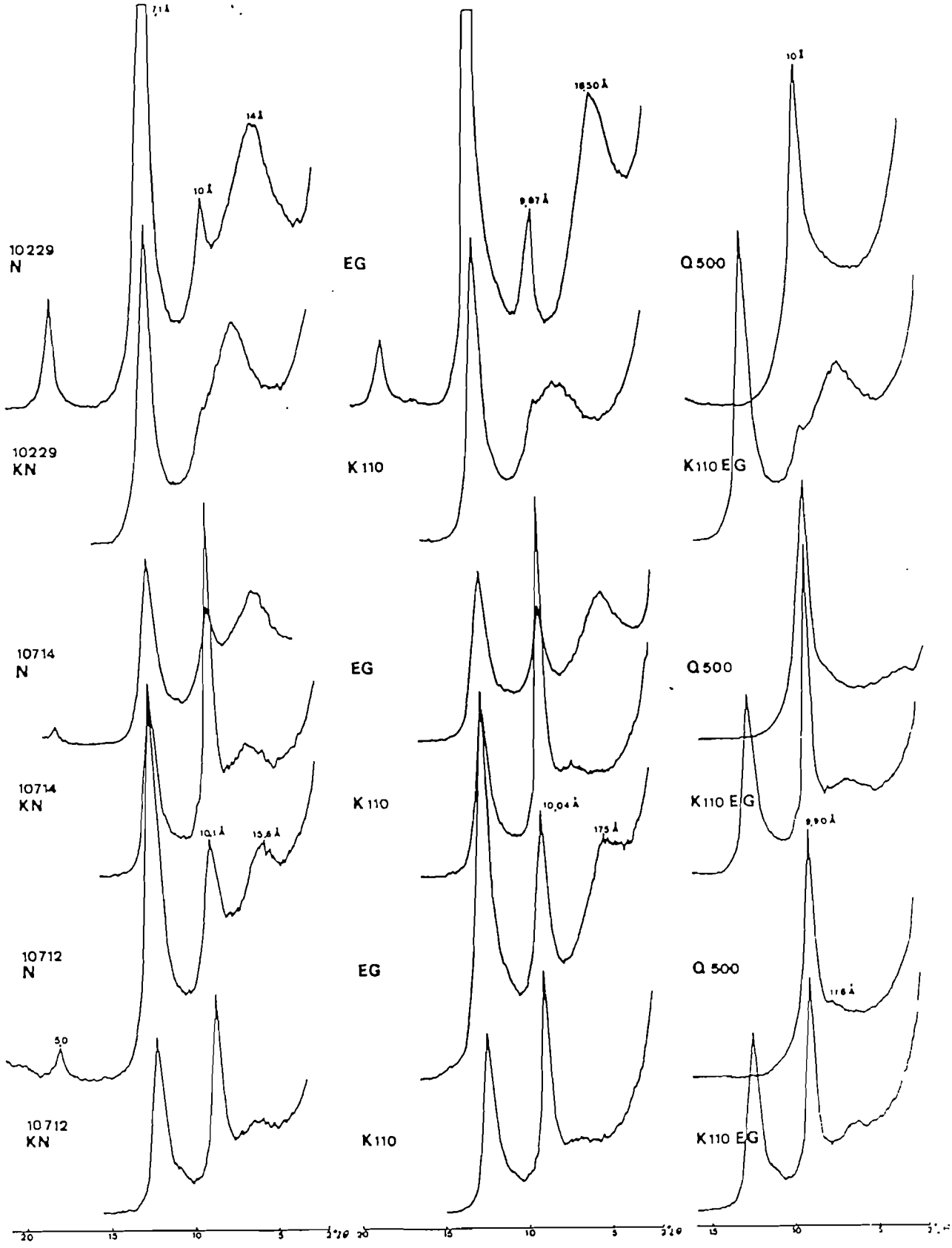


Figure N°20: Caractérisation de la nature des smectites par la saturation au K^+ et comparaison avec les trois tests de routine. L'échantillon 10229 renferme une smectite de néoformation (SmN). L'échantillon 10712 contient une smectite de transformation et une participation assez faible de SmN. L'échantillon intermédiaire (10714) renferme un assemblage "équilibré" (57% - 43%) à SmN et SmT. Tous les échantillons ici présentés montrent la présence ubiquiste de kaolinite et d'illite (fraction <2µm, ES). Echelle horizontale en °2θ.

Tableau 3: Bujumbura.

N°	4,4 Å	4,26 Å	3,3 Å	3,19 Å	7,0 Å	10 Å	14 Å	Phyllosilicates	% QZ	% Felds.	(*)	(**)	Min.access.
9369	89	8,5	71	18	81	48	58	82	10	8	34	27,9	Calcite
9370	76	11	77	23	77	43	36	73	16	11	25,5	18,6	Calcite
9371	103		50	13	43	36	45	82	9	9	32,1	26,3	Calcite
9372	90	6	82	14,5	62	50	68	79	14	6	32,9	26	(Calcite)
9373	92		66	19,5	43	41	57	76	13	11	45,2	34,4	
9374	99	11	79	20	46	50	66	77	14	9	43,3	33,3	
9375	79	6	79	20	55	70	72	87	4	9	45,6	39,7	

Tableau 4: Nyanza-Lac (+ Rumonge).

N°	4,4 Å	4,26 Å	3,3 Å	3,19 Å	7,0 Å	10 Å	14 Å	Phyllosilicates	% QZ	% Felds.	(*)	(**)	Min.access.
9364	71	10	49	18	62	37	37	82	7	11	14,7	12,2	
9365	66	8	62	16	60	30	38	73	16	11	16,7	12,2	
9366	74	10	50	10	50	37	39	85	9	7	26,5	22,5	
9367	84	19	116	11	63	21	126	66	30	3	59	38,9	
9368	132		46	32	115	35	40	82	5	14	17,3	14,2	

Légende:

(*): %Smectites dans les minéraux phyllosilicatés; quantification par la méthode des intensités brutes.

(**): %Smectites dans l'échantillon global, en tenant compte du quartz et des feldspaths.

Min. access. : minéraux accessoires.

Annexe III.10: comparaison des cristallinités des smectites en fonction des localités.

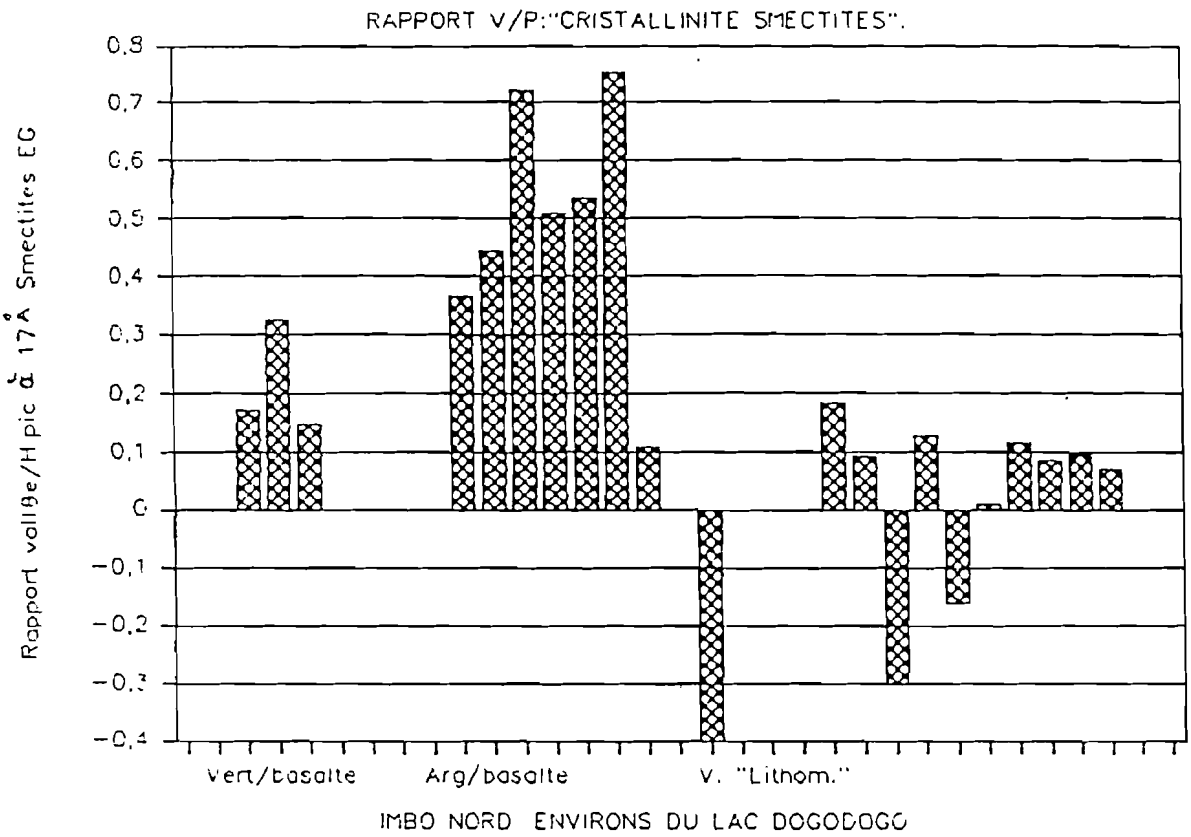


Figure A° : Mesure du paramètre v/p des smectites en vue de contraster vertisols "lithomorphes", topomorphes et les produits argileux d'altération du basalte de la région de l'Imbo Nord.

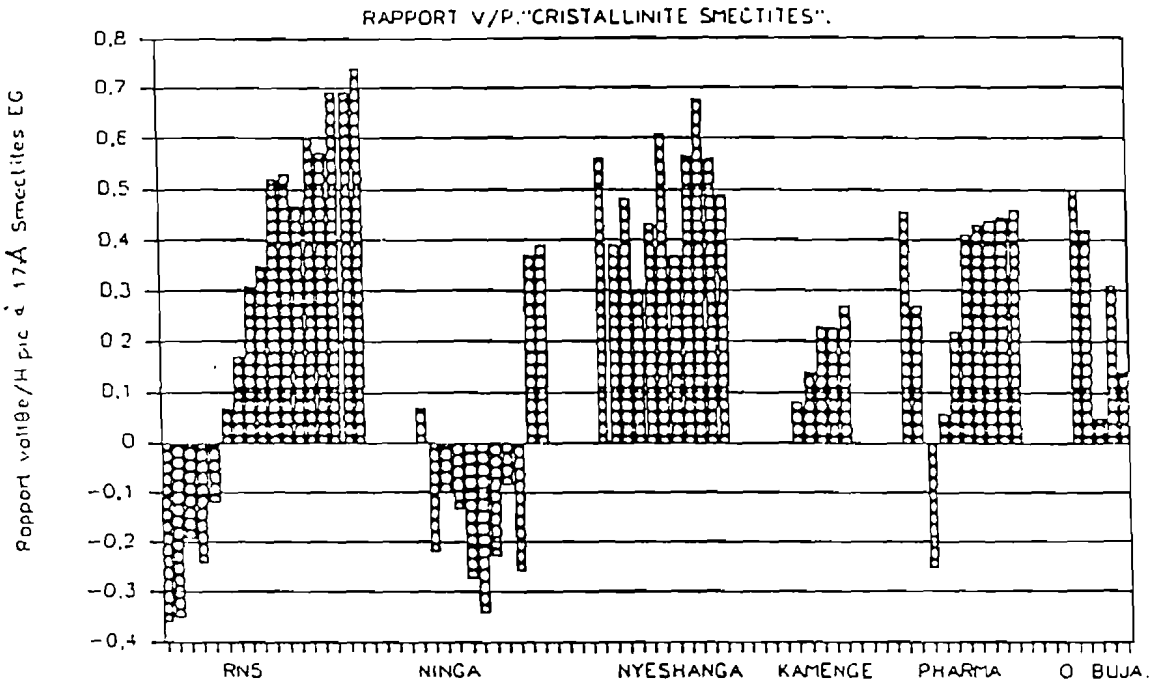


Fig. 3.

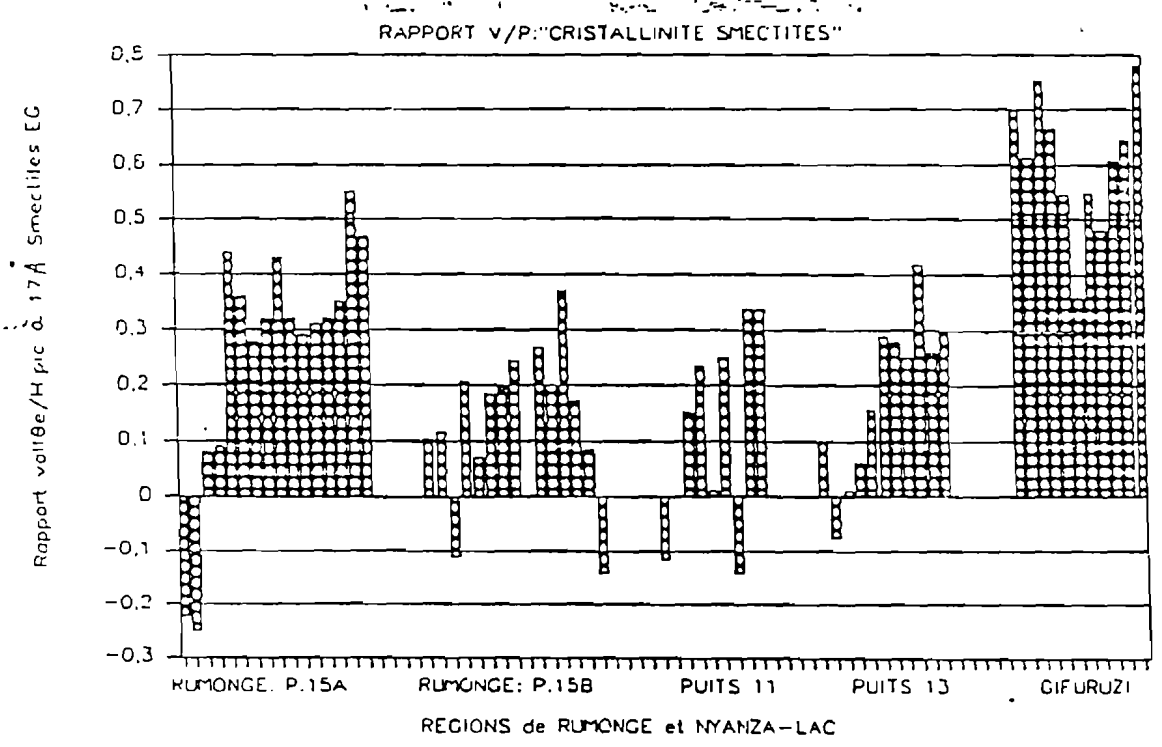


Figure 3 : Mesure du paramètre v/p des smectites. Classement des échantillons par puits et par zone géographique. Les échantillons d'un même puits sont classés de gauche à droite par ordre de profondeur croissante (fraction <2µm, ES).

ANNEXE IV: ANALYSES CHIMIQUES.

IV.1. Mode opératoire adopté à Liège pour l'analyse des Smectites de l'Imbo-Nord.

- Extraction de la fraction < à 2µm par sédimentométrie.
- Attaque tri-acide: HF - HCl - $HClO_4$, poursuivie à sec et reprise par HCl.
- Dosage de la Silice par gravimétrie après fusion à la soude et insolubilisation en milieu contenant $HClO_4$.
- Dosage du Fe^{2+} par la méthode d'Ungethum.
- Dosage des autres éléments par absorption atomique.
- Détermination de la perte au feu (P.A.F) à 1050°C.

Les résultats sont repris dans les tableaux de l'annexe IV.2.

Annexe IV.2: Résultats des analyses chimiques effectuées à Liège.

N°	*	(1) 11480	(1) 11481	(1) 11485	(1) 11486	(2) 11487	(2) 11489	(3) 11493	(3) 11494	(3) 11498	(3) 11500
SiO2	*	55,31	51,24	46,68	50,98	49,93	49,24	40,5	39,08	44,42	41,5
P2O5	*	0,01	0,04	0,04	0,13	0,03	0,03	0,08	0,08	0,12	0,13
Al2O3	*	19,24	10,29	19,98	17,87	15,94	15,36	17,98	18,24	15,13	15,78
Fe2O3	*	5,65	17,58	10,76	9,84	9,3	8,91	12,96	13,46	8,49	10,16
FeO	*	0,14	0,69	0,26	0,24	0,23	0,31	0,25	0,12	0,37	0,22
TiO2	*	1,14	1	1,48	2,58	1,6	1,65	1,2	1,32	1,54	1,41
MnO	*	0,02	0,06	0,01	0,03	0,09	0,12	0,16	0,17	0,14	0,18
CaO	*	1,25	0,46	0,82	1,22	0,22	0,23	1,62	1,56	2,13	0,99
MgO	*	2,74	2,83	1,35	1,69	3,09	2,93	1,68	1,47	4,06	2,73
K2O	*	0,07	1,73	0,14	0,05	2,25	2,19	0,49	0,5	0,63	1,17
Na2O	*	0,5	0,06	0,11	0,09	0,12	0,12	0,12	0,07	0,17	0,11
PAF(1050)	*	13,09	14,04	17,27	13,91	16,48	17,86	22,7	23,44	22,44	25,23
V2O5	*	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
Cr2O3	*	0,01	0,02	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
NiO	*	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

(1): relation avec le basalte
(2): vertisols "topomorphes"
(3): vertisols "lithomorphes"

IV.3. Résultats (bulletins) analytiques des pédologues (ISABU):

CHIMIE DES VERTISOLS.

Tableau n°1 : Profil INO 1.

N°	PH		Complexe adsorbant en méq/100 gr					
	1/5 , 20°C			Echange				
Labo							V%	
	H O	KCl(1N)	Ca	Mg	K	Na		
A879	6.7	5.7	11.37	11.03	2.11	0.02	24.53	94.2
A880	7.1	5.9	9.51	15.26	1.41	0.06	26.24	78.2
A881	7.1	6.5	8.39	18.33	1.43	0.16	28.3	82.7

Tableau n°2 : Profil INO 4.

N°	PH		Complexe adsorbant en méq/100 gr					
	1/5 , 20°C			Echange				
Labo							V%	
	H O	KCl(1N)	Ca	Mg	K	Na		
A888	6.8	5.8						
A889	8.3	6.5	16.15	10.88	0.35	2.34	30.32	74

P2264	Roche non	R	8.4	6.9	23.02	5.81	0.46	0.48	29.77			

Tableau n°5: Profil W6 (P236): Argilesnoires tropicales bien drainées: sol vertique brun.

N°	Profond.	Horiz.		PH		Complexe adsorbant en (méq/100 gr) NaAcO					
				1/5			Echange				
Labo	(Cm)	génét.								CEC	V%
			H O	KCl	Ca	Mg	K	Na			
P2219	0 - 10	Ap	7.2	6	28.87	13.28	1.18	0.06	43.39	47.2	92
P2220	10 - 43	C	7.1	5.6	29.56	11.54	0.27	0.13	41.5	46.3	89.7
P2221	43 - 75	C	7.6	6.2	*34,54	*12,83	0.32	0.2	*47,89	*47	*100
P2222	75 - 83	C/R	8.6	7.1	*36,08	*13,02	0.36	0.23	*49,59	*44,7	*100
P2223	83 - 120	R	8.4	7.3	*28,17	*10,99	0.5	0.45	*40,11	*42,9	*93,6

Tableau n°6: Profil W8 (214): Argiles noires tropicales à hydromorphie intergrade régosol salé.

N°	Profond.	Horiz.		PH		Complexe adsorbant en (méq/100 gr) NaAcO					
				1/5			Echange				
Labo	(Cm)	génét.								CEC	V%
			H O	KCl	Ca	Mg	K	Na			
P2123	0 - 37	A	9.2	7.5	16.5	21.9	1.98	14.9	55.28	51.2	100
P2124	37 - 75	C	9.5	7.6	13.75	15.7	1.64	15.1	46.19	42.6	100
P2125	75 - 120	C	9.5	7.6	14.15	19.5	1.52	22	46.17	41.4	100

IV.3. Résultats (bulletins) analytiques des pédologues (ISABU):
CHIMIE DES VERTISOLS.

Tableau n°7 : Profil INO 19.

N°	PH		Complexe adsorbant en méq/100 gr					
	1/5 , 20°C		Echange					
Labo	H O	KCl(1N)	Ca	Mg	K	Na		V%
A967	7.2	6.2	7.35	5.43	0.14	0.49	11.41	85.7
A968	9.4	7.5	7.28	16.26	0.2	4.52	28.96	89.2

Tableau n°8 : Profil INO 23.

N°	PH		Complexe adsorbant en méq/100 gr					
	1/5 , 20°C		Echange					
Labo	H O	KCl(1N)	Ca	Mg	K	Na		V%

Tableau n°9

N°		Complexe adsorbant en (méq/100 gr)					
				Echange			
Labo							
	PH	Ca	Mg	K	Na	:	V%
R131	7.1	1	1,6	0,2	0,1	2,9	82
R132	8.2	4,4	5	1,2	3,8	14,4	61
R133	8.9	10	5,5	0,8	3,8	20,1	>100
R134	9.4	10	3,6	0,3	2,6	16,5	>100

Tableau n°10 : Imbo-Centre: Profil n°14

N°		Complexe adsorbant en (méq/100 gr)					
				Echange			
Labo							
	PH	Ca	Mg	K	Na	:	V%
R172	6,4	12,6	7,0	2,6	0,3	22,5	55,6
R173	5,7	11,6	7,0	1,3	0,3	20,2	51,0
R174	5,6	10,6	7,0	0,1	0,7	18,4	48,5
R175	5,9	13,0	10,0	0,5	1,2	24,7	95,2
R176	6,2	13,4	8,2	1,1	0,7	23,4	41,2
R177	6,3	14,8	10,0	1,1	0,9	26,8	66,6
R178	6,3	13,6	10,0	1,2	0,8	25,6	54,5
R179	6,3	13,6	8,2	1,2	0,7	23,7	95,1

Tableau n°11 : Imbo-Centre: Profil n°19

N°		Complexe adsorbant en (méq/100 gr)					
				Echange			
Pros.							
	PH	Ca	Mg	K	Na	:	V%
R221	6.7	14,0	18,4	2,4	0,4	35,2	84,4
R222	7.2	17,6	15,0	7,3	2,1	42,0	81,0
R223	9,0	20,8	3,5	4,7	2,2	31,2	62,0
R224	9.1	13,5	6,0	1,7	4,2	25,4	52,0
R225	8.7	14,6	20,0	4,6	3,7	42,9	68,5
R226	8,0	28,5	20,0	5,9	6,7	61,1	>100
R227	8.6	17,2	7,9	0,8	6,3	32,2	73,0
R228	8.7	20,2	20,0	4,5	5,5	50,2	89,1

Tableau n°12

N°	Profond.		Complexe adsorbant en (méq/100 gr)					
					Echange			
Pros.	(Cm)							
		PH	Ca	Mg	K	Na		V%
R279	17	6.4	12.6	8.2	1.5	0.2	22.5	87.5
R280	33	6.6	11.4	10	1	-	24.4	87.1
R281	61	6.5	6.2	6.6	0.4	0.3	13.5	45
R282	70	6.6	9.7	10.5	0.3	0.2	20.7	97.6
R283	107	6.7	10.2	14	0.4	0.4	25	92.9
R284	140	6.7	6.8	8.2	0.9	0.1	26	78
R285	190	6.9	6.8	7	0.3	0.1	14.2	71
R286	240	6.9	7.5	6	0.3	0.2	14	51.8

R 282 SO méq -tr Cl méq/l 1,50

R 283 " -- 0,63 0,63

Tableau n°13

N°	Profond.		Complexe adsorbant en (méq/100 gr)					
					Echange			
Labo	(Cm)							
		PH	Ca	Mg	K	Na		V%
R300	10	7.4	4	1.4	1.4	-	5.8	>100
R301	21	7.1	1.7	2.3	0.7	-	4.7	59
R302	49	7.1	2.2	1.5	0.2	-	3.9	48.7
R303	90							

Tableau n°14

N° Labo	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CEC
D254							
D255	0.82	0.33	0.02	0.14	-	-	1.31
D256	5.54	2.84	2.13	9.38	5.30	0.01	25.20
D257							

Tableau n°15

N° Labo	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CEC	Fe O	PO
NL14-1	10.18	4.77	0.63	0.10	0.00	0.03	15.71	3.25	0,002
2	14.72	3.27	0.21	0.20	0.00	0.05	18.45	3.08	0,009
3	9.58	5.27	0.21	0.12	0.00	0.10	15.68	1.93	0,004

Tableau 3: **RESULTATS DE MESURES DE LA Capacité d'Echange Cationique (C.E.C).**

N° *ECH*[s].	C.E.C.
9352	82,7
9353	58,6
9354	49,3
9355	62,3
9356	60,6
9357	52,4
9358	60,9
9359	41,2
9360	33,6
9361	69,5
9362	107,4
9363	96,8
9364	29,7
9365	30,7
9366	40,9
9367	60,5
9368	29,3
9369	52,3
9370	42,2
9371	39,0
9372	40,1
9373	45,5
9374	50,0
9375	44,9

§§§§§§§§§§§§§§§§