

N° d'enregistrement
au C. N. R. S.
A. O. 5396

THÈSE

présentée à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

pour obtenir

le grade de Docteur ès Sciences Naturelles

par

Roger FAUCK

*CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES SOLS
DES RÉGIONS TROPICALES*

**LES SOLS ROUGES SUR SABLES ET SUR GRÈS
D'AFRIQUE OCCIDENTALE**

Soutenue publiquement le 18 Mars 1971, devant la Commission d'Examen

J U R Y

MM. G. MILLOT, Président
Ph. DUCHAUFOR
J. TRICART
G. AUBERT

LES SOLS ROUGES SUR SABLES ET SUR GRES

D'AFRIQUE OCCIDENTALE

R. FAUCK

E R R A T A

- Page 13 - 4ème ligne avant fin, lire "les points importants"
- Page 22 - 23ème ligne, lire "Il est donc plausible de"
- Page 30 - 2ème ligne, lire "ont pu être"
- Page 32 - avant dernière ligne, lire "en matières organiques"
- Page 35 - 7ème ligne, lire "moyenne à bonne"
- Page 42 - 2ème ligne, barrer le mot "Mais"
- Page 42 - 8ème ligne, lire "parfois avec des"
- Page 48 - 6ème ligne, lire microbienne, à la place de microbiologique
- Page 54 - 7ème ligne, lire "10 000 à 6 000 BP"
- Page 66 - 3ème ligne avant fin, lire "métamorphisme"
- Page 68 - 17ème ligne, lire minéralogique, à la place de chimique
- Page 72 - 19ème ligne, lire "prédominant"
- Page 81 - 19ème ligne, lire "évolutions"
- Page 87 - 5ème ligne, lire "ce qui les fait"
- Page 92 - 13ème ligne, lire "toujours"
- Page 99 - 10ème ligne, lire "siliceux"
- Page 99 - 12ème ligne, lire "300 à 1.500 mm"
- Page 101 - 4ème ligne, lire "A-C"
- Page 105 - Ajouter après triacide: "(exprimé en Fe_2O_3)"
- Page 111 - 4ème ligne, lire "des niveaux différents pour chaque domaine climatique. La relation..."
- Page 126 - 2ème ligne, lire "groupe appauvri"
- Page 133 - 25ème ligne, au lieu de "ont" lire "aient"
- Page 135 - 15ème ligne, lire "pas perdu"
- Page 136 - 15ème ligne, lire "puits"
- Page 146 - 7ème ligne, lire "aux dépens des"
- Page 173 - dernier paragraphe à supprimer car frappé deux fois: éliminer quatre dernières lignes et trois premières de la page 174
- Page 174 - 16ème ligne, lire "dans des alfisols"
- Page 175 - lire "tailles des limons"

- Page 180 - 16ème ligne, lire "s'est traduite"
Page 191 - 16ème ligne, lire "totale"
Page 191 - 18ème ligne, lire "du fait de la"
Page 195 - 4ème ligne avant fin, lire "quartz fins"
Page 208 - 25ème ligne, lire "ou des surfaces"
Page 210 - 3ème ligne avant fin, lire "cette alumine"
Page 218 - 3ème ligne avant fin, lire "siliceuse"
Page 224 - 13ème ligne, lire "puits"
Page 231 - 21ème ligne, lire "chapitre IV"
Page 233 - 8ème ligne, lire "a été"
Page 238 - 4ème ligne avant fin, lire "d'évaluation"
Page 252 - 15ème ligne, lire "fer libres"
Page 252 - 22ème ligne, lire "insistent"
Page 254 - 21ème ligne, barrer "milliéquivalents pour 100 grs d'argile"
Page 258 - 14ème ligne, lire "nourrissage"
Page 259 - 8ème ligne, lire "certaines"
Page 261 - 10ème ligne, lire "a un rôle"
Page 261 - 13ème ligne, lire "synonyme"
Page 264 - 8ème ligne, lire "à gris foncé"
Page 266 - 18ème ligne, lire "à plus de 200 cm"
Page 274 - 8ème ligne, lire "De plus"
Page 275 - 8ème ligne, lire "présentés"
Page 308 - avant dernière ligne, au lieu de "cohésion", lire "d'induration"
Page 310 - 13ème ligne, lire "tour à tour"
Page 315 - 5ème ligne, lire "entre 0 et 6 ppm au lieu de 1 et 6 ppm"
Page 346 - 3ème ligne, lire "LENEUF".

Doyen: Professeur J.H. VIVIEN.

Doyens Honoraires: A. KIRRMANN, P. LACROUTE, H.J. MARESQUELLE, G. MILLOT.

Professeurs Honoraires: P. DE BEAUCHAMP, L. BOISSELET, H. CARTAN, G. CERF, C. CHABAUTY,
A. CHRETIEN, J. DENY, Ch. EHRESMANN, M. FRECHET, Mlle. S.GILLET, A.HEE, E. HOCART,
A. KIRRMANN, G. LEMEE, P. L'HERITIER, A. LICHNEROWICZ, H.J. MARESQUELLE, L. HEEL,
Ch. SADRON, F. TERROINE, H. VILLAT, H. WEISS, Et. WOLFF, J. YVON.

Maîtres de Conférences Honoraires: R. WEIL.

Professeurs:

H. FORESTIER	.....	T.	Chimie générale
J. ROTHE	.....	T.	Physique du Globe
P. LACROUTE	.....	T.	Astronomie
J. H.VIVIEN	.....	T.	Zoologie et Embryologie expérimentale
A. MAILLARD	.....	T.	Physicochimie du Pétrole
S. GORODETZKY	.....	T.	Physique générale et Physique nucléaire
L. SACKMANN	.....	T.	Mécanique des Fluides
J. BYE	.....	T.	Chimie Physique
Mlle. M. PEREY	.....	T.	Chimie nucléaire
S. GOLDSZTAUB	.....	T.	Minéralogie et Pétrographie
P. JOLY	.....	T.	Biologie Générale
H. BENOÎT	.....	T.	Physicochimie macromoléculaire
P. GUER	.....	T.	Physique Générale et Physique Corpusculaire
G. MILLOT	.....	T.	Géologie et Paléontologie
R. LECOLAZET	.....	T.T.P.	Physique du Globe
H. SAUCIER	.....	T.T.P.	Minéralogie
R. ROHMER	.....	T.	Chimie minérale
Mlle. A. GAGNIEU	.....	T.T.P.	Botanique
S. NIKITINE	.....	T.	Physique générale
F. STUTINSKY	.....	T.	Physiologie générale
B. WURTZ	.....	T.T.P.	Chimie biologique
J. BRENET	.....	T.	Electrochimie
G. OURISSON	.....	T.T.P.	Chimie
A. COCHE	.....	T.T.P.	Physique nucléaire
R. CERF	.....	T.	Physique générale
J. FRENKEL	.....	T.T.P.	Mathématiques
P. TAGLANG	.....	T.	Physique
J.P. LONGCHAMP	.....	T.T.P.	Physique
A. DELUZARCHE	.....	T.T.P.	Chimie
J.B. BONNET	.....	T.T.P.	Chimie physique
R. ARMBRUSTER	.....	T.T.P.	Physique
A. ROCHE	.....	T.T.P.	Physique du Globe
L. HIRTH	.....	T.	Microbiologie
A. SIGOT	.....	P.S.C.	Zoologie
A. FUCHS	.....	T.	Mécanique rationnelle
A. GALLMANN	.....	T.T.P.	Physique
P. MIALH	.....	T.T.P.	Physiologie animale
J.P. EBEL	.....	T.	Chimie biologique
J. PARROD	.....	T.T.P.	Chimie

R.	WEY	T.T.P.	Chimie
Mme D.	MAGNAC	T.T.P.	Physique
M.	DAUNE	P.S.C.	Physique
J.P.	ADLOFF	T.T.P.	Chimie nucléaire
D.	BERNARD	T.T.P.	Méthodes mathématiques de la physique
E.	DANIEL	T.	Physique expérimentale
P.	CHEVALLIER	T.	Physique
J.	GREMILLARD	T.T.P.	Mécanique des fluides
P.	CARTIER	T.	Mathématiques
G.	REEB	T.	Topologie
J.	WUCHER	P.S.C.	Physique
Mme	BRUNI M.	T.T.P.	Chimie
H.	DURANTON	T.T.P.	Botanique
R.	WEISS	T.T.P.	Chimie
P.	PEDERLIN	T.T.P.	Chimie
J.	LERAY	P.S.C.	Physique
J.P.	SCHWING	T.T.P.	Chimie
M.	SIESKIND	P.S.C.	Physique
G.	MONSONEGO	T.	Physique théorique
P.	GABRIEL	T.T.P.	Mathématiques
C.	WIPPLER	T.	Physicochimie des Hauts Polymères Industriels
P.A.	MEYER	T.T.P.	Mathématiques
G.	WEILL	P.S.C.	Physique
J.M.	BLOCH	T.	Chimie
A.	CLAUSS	P.S.C.	Chimie
E.	FOLLENIUS	P.S.C.	Zoologie
J.	LUCAS	T.T.P.	Géologie
J.J.	THIEBOLD	P.S.C.	Biologie animale
G.	GLAESER	T.	Mathématiques
J.M.	WEIL	P.S.C.	Chimie biologique
D.	FOATA	T.T.P.	Mathématiques
H.	DANAN	P.S.C.	Physique
X.	FERNIQUE	P.S.C.	Mathématiques
F.	GAUTIER	P.S.C.	Physique
G.	SUTTER	P.S.C.	Physique électronique
V.	AVANISSIAN	T.	Analyse supérieure
F.	LACROUTE	T.	Biologie végétale
J.P.	EBERHART	P.S.C.	Minéralogie
Mme	D. CAGNIANT	P.S.C.	Chimie
J.	STREITH	P.S.C.	Chimie
J.M.	LEHN	P.S.C.	Chimie
Cl.	ROBERT	P.S.C.	Physique
A.	GIRARDIE	P.S.C.	Biologie animale
F.	BECKER	P.S.C.	Physique mathématique
M.	KAROUBI	P.S.C.	Mathématiques
A.	MIGNOT	P.S.C.	Mathématiques appliquées.

Professeurs associés:

A. BANDERET (E.A.H.P.) - H. HAKEN (Physique) -

Maîtres de Conférences et Chargés d'enseignement:

Mme WINTER Chr.	Physique
M. GOUNOT	Botanique
J. DEHAND	Chimie minérale
J. PRADINES	Mathématiques
R. GERARD	Mathématiques
J. ROUX	Botanique
R. VOLTZ	Physique théorique
A. MICHARD	Géologie
Y. BOULANGER	Chimie biologique
D. DACUNHA-CASTELLE	Mathématiques
J.P. BRETAGNOLLE	Mathématiques
J.J. RIEHL	Chimie
Cl. DELLACHERIE	Mathématiques
J. FAURE	Chimie physique
M. GROSMANN	Physique
G. DUNOYER DE SEGONZAC	Géologie
A. CHARLIER	Physique
Fr. SCHMITT	Physique
E. BIANCO	Mathématiques
J. MARTINET	Mathématiques
J.P. JOUANOLOU	Mathématiques
Ph. ROPARTZ	Psycho-physiologie
Cl. TAVARD	Physique

Maîtres de Conférences associés:

E. DADE (Mathématiques) - M. DOSTAL (Mathématiques) - M. NIKOLIC (Physique corpusculaire) - J. WALSCH (Mathématiques) -

Secrétaire général de la Faculté: M. N.

A V A N T - P R O P O S

La carrière suivie à l'O.R.S.T.O.M. depuis 1950, époque à laquelle G. AUBERT et R. MAIGNIEN m'ont initié à la pédologie tropicale, m'a amené à étudier des sols de différents territoires d'Afrique de l'Ouest, en particulier de Casamance (Sénégal), de Guinée, du Dahomey et de Haute-Volta.

Certains des sols que j'avais décrits et cartographiés se ressemblaient étonnamment, en particulier les profils de couleur rouge sur grès de Casamance, du Sud-Dahomey et de l'ouest de la Haute-Volta. En 1965, les études de terrain étant terminées, j'ai pensé qu'une synthèse sur ces sols rouges s'imposait. Le premier document établi était imparfait, mais il mettait en évidence certains problèmes intéressants de pédogénèse. Je me suis alors efforcé de les approfondir, et c'est seulement à ce moment que l'idée de rédiger un mémoire de thèse d'Etat m'est apparue.

La réalisation de ce mémoire n'a pas été facile compte-tenu des fonctions administratives et des diverses tâches de gestion qui m'incombaient. Mais si elle a pu se faire, c'est grâce à de nombreuses collaborations et à l'aide désintéressée de plusieurs collègues. Je considère donc ce travail, bien imparfait, un peu comme une oeuvre collective.

Au départ, j'ai été secondé, pour les travaux de terrain, par J.P. COINTEPAS en Casamance, par P. WILLAIME au Dahomey, par E. GUICHARD et P. MERCKY en Haute-Volta. Ensuite, les opérations analytiques ont été réalisées par différents laboratoires, soit de l'O.R.S.T.O.M. au Centre de Dakar et dans les services scientifiques centraux de Bondy, soit de l'Institut de Géologie de Strasbourg. Mais, lorsque le thème de recherches s'est développé, le stade d'analyses de routine a été vite dépassé. Une collaboration s'est instaurée entre un certain nombre de chercheurs et moi même, collaboration se rapportant parfois à des points de détail, mais essentielle pour la solution des problèmes posés.

C'est pourquoi je suis redevable à P. PELLOUX (Bondy), à Hélène PAQUET (Strasbourg), à Mme DELAUNE, Melle G. FUSIL, M. PINTA, (Bondy) de leurs conseils, de leurs déterminations, de leur complaisance pour satisfaire des demandes toujours extrêmement pressées. Au Centre de Dakar, Ch. THOMANN, J.M. WACKERMANN, S. PEREIRA-BARRETO, A. CHAUVEL, et à Strasbourg G. SIEFFERMANN, m'ont aidé en effectuant de nombreuses déterminations et interprétations. Le dialogue que j'ai poursuivi pendant plusieurs années avec tous ces collègues a été fructueux, et s'il n'avait pas été possible, ce mémoire n'existerait pas. C'est à l'ensemble de ces chercheurs, que je considère comme des collaborateurs, que j'adresse mes vifs remerciements.

La finition de ce travail a également été facilitée par des aides matérielles multiples. Au Centre de Dakar, je citerai le laboratoire de pédologie, dirigé successivement par Melle Ch. THOMANN, P. RETY et D. RAMBAUD. Les techniciens de ce laboratoire m'ont été toujours très dévoués et je les en remercie. Il en est de même pour le laboratoire de biologie des sols avec Cl. MOUREAUX, G. JUNG et P. ROGER, pour l'atelier de cartographie et de dessin de J.C. POTTIER, pour le laboratoire de Géologie avec J.M. WACKERMANN et J.C. PION. Hors de Dakar, je n'oublierai pas l'aide de N. TRAUTH, de F. WEBER et des techniciens de l'Institut de Strasbourg, enfin de B. DABIN et de toute son équipe à Bondy.

La finition en temps du document a été rendue possible par le dévouement et la qualité du travail de P. SOSSOU dactylographe, et de Mme J. BOUDERGUES documentaliste, auxquels s'est jointe Mme Cl. HANRION pour la frappe définitive. M'ont été précieux, pour la mise au point finale, les conseils de J. MAYMARD ainsi que ceux de P. SEGALEN, avec lequel de très nombreux échanges de vues se sont établis depuis plusieurs années.

Je suis reconnaissant au Directeur Général de l'O.R.S.T.O.M. le Professeur G. CAMUS, et au Secrétaire Général J. SEVERAC, d'avoir facilité au mieux la réalisation de mes travaux scientifiques. Je remercie vivement Mrs. les Professeurs Ph. DUCHAUFOR et J. TRICART de m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie du Jury.

Mais j'ai une dette importante envers Mr. G. AUBERT et Mr. le Doyen G. MILLOT. G. AUBERT a créé une école française de pédologie tropicale et la publication du présent mémoire fait partie de son oeuvre. Il m'a octroyé ses conseils, en particulier en critiquant les textes successifs qui ont été élaborés, et surtout il m'a toujours prodigué sa confiance tout au long de ma carrière. Je l'en remercie chaleureusement. Le Doyen G. MILLOT a accepté de patronner ma thèse, ce qui l'a amené à perdre beaucoup de temps pour relire et critiquer des rédactions souvent hâtives et de forme insuffisamment élaborée. C'est grâce à lui qu'un point final a pu être mis à ce travail, je lui exprime ma profonde gratitude.

Enfin, l'aide inlassable de Mme S. FAUCK a été déterminante. Je lui dédie cette thèse ainsi qu'à mes parents.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SOLS

DES REGIONS TROPICALES

LES SOLS ROUGES SUR SABLES ET SUR GRES

D'AFRIQUE OCCIDENTALE

S O M M A I R E

AVANT PROPOS

PRESENTATION

PREMIERE PARTIE : LES SOLS ET LEUR ENVIRONNEMENT

GENERALITES

/CHAPITRE I/ - Caractérisation des sols

- A - Origine des données
- B - Les profils de référence
- C - Etude morphologique et analytique des sols
- D - Conclusions

/CHAPITRE II/ - Les facteurs de différenciation

- A - Les Données climatiques
- B - Les roches-mères
- C - Les Données géomorphologiques
- D - Les facteurs d'ordre biologique
- E - Conclusions sur les facteurs de différenciation

/CHAPITRE III/ - Les autres sols sur sables et sur grès

Généralités

- A - Les sols "associés" aux sols rouges
- B - Les sols sur sables et grès dans d'autres régions
- C - Les sols développés sur des matériaux variés mais "similaires" aux sols rouges
- D - Conclusions sur les autres sols sur sables et sur grès

CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE

Annexes

DEUXIEME PARTIE : LES MECANISMES DE LA PEDOGENESE

Introduction : La méthode d'étude

/CHAPITRE IV/ - Le squelette sableux et son devenir dans les toposéquences

- A - Définitions
- B - Les données granulométriques sur "profils latéraux"
- C - Examens morphologiques et micromorphologiques
- D - Les conclusions du chapitre sur le devenir du squelette sableux

/CHAPITRE V/ - La différenciation texturale des horizons B

- A - Les éléments de néoformation de la granulométrie
- B - L'argilification
- C - Conclusions du chapitre sur la différenciation texturale des horizons B

/CHAPITRE VI/ -- La rubéfaction

- A - Généralités
- B - Les données bibliographiques sur la rubéfaction dans les régions tropicales
- C - Les formes du fer dans les sols rouges sur grès
- D - Les liaisons du fer avec les constituants du sol
- E - Les interprétations et les conclusions sur la rubéfaction

/CHAPITRE VII/ - La différenciation des horizons supérieurs

- A - Les faits
- B - Les facteurs et les mécanismes de l'appauvrissement
- C - Mise en évidence de certains mécanismes
- D - Conclusions sur la différenciation des horizons supérieurs

/CHAPITRE VIII/ - Résumés et conclusions générales

Liste bibliographique

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

P R E S E N T A T I O N

Les sols de couleur rouge, sur sables et sur grès, de l'Afrique Occidentale, font l'objet de la présente étude. Ces sols couvrent des surfaces importantes au Sénégal, en Haute-Volta, au Togo et au Dahomey. Malgré l'éloignement de ces divers pays et malgré la diversité des roches-mères, il est remarquable que les profils des sols présentent de grandes similitudes morphologiques. C'est cette similitude qui sera précisée et analysée, au cours de la première partie : Les sols et leur environnement.

Mais la caractérisation des sols et de leur milieu ne suffit pas pour définir la pédogénèse responsable de la différenciation particulière des profils. Il est nécessaire de rechercher les processus de la transformation de roches-mères sédimentaires variées en un sol bien typé. Ce sera l'objet de la seconde partie : Les mécanismes de la pédogénèse.

P R E M I E R E P A R T I E

LES S O L S E T L E U R E N V I R O N N E M E N T

P R E M I E R E P A R T I E

LES SOLS ET LEUR ENVIRONNEMENT

GENERALITES

Afin de simplifier le texte, le terme de sol "rouge" sera utilisé par la suite en se référant aux seuls sols de couleur rouge inventoriés sur des sables et des grès.

Dans le cours de l'étude il ne faudra pas perdre de vue que l'inventaire systématique des sols sur le terrain n'est pas terminé. Dans ces conditions, les conclusions présentées ont été établies à partir d'un échantillonnage forcément incomplet. Aussi, la notion de profils modaux (profils dont la fréquence statistique est la plus grande) n'a pas toujours été facile à dégager d'un point de vue absolu.

Pour simplifier l'exposé, de nombreuses descriptions détaillées et résultats analytiques sont fournis en annexe. Le lecteur parcourera ces documents en sachant que tout résultat d'analyse de sol doit être interprété en tenant compte des autres déterminations et du type de méthode analytique utilisé.

CHAPITRE I - CARACTERISATION DES SOLS

A - ORIGINE DES DONNEES

Dans les trois régions étudiées, Sénégal, Haute-Volta, Togo-Dahomey, nous avons choisi un certain nombre de profils. Généralement, il s'agit de ceux qu'il nous a été possible d'approfondir suffisamment pour atteindre les roches-mères. Nous présentons ces profils non comme des profils types, mais comme des profils de référence, jugés suffisamment représentatifs, d'après nos connaissances actuelles.

Par la suite, lors de l'examen comparatif des caractéristiques morphologiques et analytiques, nous avons tiré parti, complémentirement, des données fournies par d'autres chercheurs. Les travaux les plus importants utilisés sont les suivants :

Au Sénégal, et en Gambie :

DUBOIS (1949), MAIGNIEN (1956,1959 a, 1960 a, 1962 et 1965)
COINTEPAS (1960), PEREIRA-BARRETO et RAYNAL (1962), FAUCK, TURENNE et VIZIER (1963), TOBIAS (1965), PEREIRA-BARRETO (1967), STAIMESSE (1967),LEPRUN (1967), BALDENSPERGER, STAIMESSE et TOBIAS (1968), HILL (1968 et 1969), PIERI (1969), SEGUY (1969), FAUCK, MOUREAUX et THOMANN (1969).

En Haute-Volta :

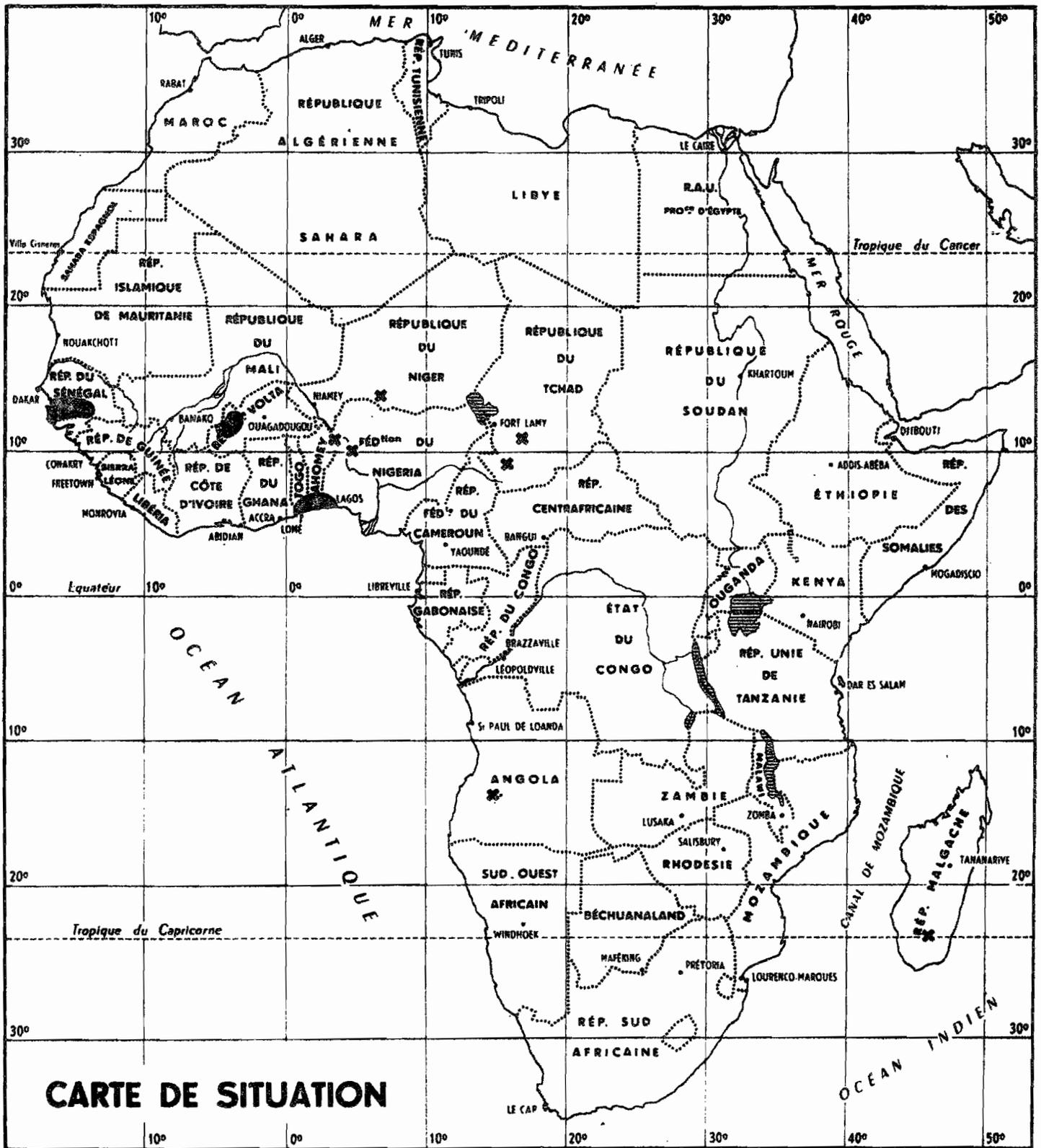
AUBERT (1941), BRAMMER (1955), DUDAL (1961), JENNY (1963), GUICHARD (1966 b),LEPRUN et MOREAU (1969), RIEFFEL et MOREAU (1969).

Au Togo et au Dahomey :

COMBEAU (1951), DABIN (1956), OCHS (1958), WILLAIME (1959, 1960, 1961, 1962 et 1963), OCHS et OLIVIN (1960), LAMOUROUX (1962 et 1964) KOFFI et WILLAIME (1963), VOLKOFF et WILLAIME (1963), WILLAIME et VOLKOFF (1966), MILLETTE et VIEILLEFON (1967).

La plupart des auteurs ont classé les sols rouges comme faiblement ferrallitiques (AUBERT, 1954, 1963 et 1964), (AUBERT et DUCHAUFOR, 1956). Ce terme de classification sera parfois utilisé dans la suite du texte.

Fig. A1



CARTE DE SITUATION

SERVICE CARTOGRAPHIQUE DE L'O.R.S.T.O.M



Localisations des sols rouges de l'étude.



Régions où ont été signalés les principaux sols rouges comparables.

B - LES PROFILS DE REFERENCE

1) Au Sénégal

Les sols rouges faiblement ferrallitiques couvrent des surfaces importantes en Casamance, plus exactement au sud de la rivière Gambie, en particulier près de Bignona, de Sédhiou et au sud de Ziguinchor. Des secteurs plus localisés ont été repérés près de Kolda et de Oussouye. L'extension de ces sols semble se poursuivre en Guinée (Bissao). Mais des flots ont également été inventoriés au nord du fleuve Gambie, dans des régions plus sèches. C'est le cas de Nioro-du-Rip, et de Goudiry (Sénégal-Oriental). Dès à présent, il apparaît que des différences climatiques importantes existent entre toutes ces régions. Par contre, le point commun, est le développement de ces sols sur le Continental terminal. Il s'agit de sables argileux, plus ou moins ferruginisés et grèsifiés, d'âge miopliocène, qui couvrent la plus grande partie du Sénégal. Les profils présentés sont les suivants : CA 50, CA 1, CC 68, NR 2.

a) Profil CA 50

Description : Tableau n° A 1

Résultats analytiques : Tableau n° A 2

Le profil CA 50 est situé en Moyenne-Casamance, à Séfa, dans le secteur de la SODAICA - (Société de Développement Agricole et Industriel de la Casamance). Il se trouve sur la route de Koussy vers N'Diama, au niveau de l'ancienne parcelle 265 de la C.G.O.T. (Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux). Creusé dans une lisière forestière, presque en sommet de crête, en fait au début d'une longue pente de l'ordre de 2 %, ce profil est actuellement sous un couvert de savane arborée assez dégradée par les feux de brousse.

Pour l'instant, les points essentiels à retenir de la lecture de la description et des résultats analytiques sont les suivants :

- la grande profondeur, l'exploration par des racines étant visible à plus de quatre mètres ;
- la couleur rouge homogène, notée au code Munsell de 2,5 YR 4/6 à 10 R 4/8 ;
- les transitions très progressives entre horizons, les indices de bariolages de couleurs ne débutant pratiquement qu'à quatre mètres ;

- l'homogénéité texturale de 100 à 400 cm, avec des teneurs en argile granulométrique (0-2 μ) de 48 à 51 % ;
- la présence de "pseudo-sables" dans la plupart des horizons. Pour le pédologue de terrain, ces "pseudo-sables" sont des sables agglomérés par des ciments rouges, et assez résistants à la dégradation par écrasement ;
- les variations des critères de friabilité et de cohésion des divers horizons.

b) Profil CA 1

Description : Tableau n° A 3 (en annexe en fin de la première partie).

Résultats analytiques : Tableaux n° A 4 et A 5 (en annexe de la première partie).

Le profil CA 1 a été creusé au sud de Ziguinchor (Basse-Casamance) dans la forêt classée des Bayottes, reboisée en teck (*Tectonia grandis*). Il est situé sur une butte de terrain, relativement étroite, bien drainée extérieurement vers une large plaine plus ou moins temporairement inondée. La lecture des tableaux 3, 4 et 5 met en évidence :

- la profondeur et l'homogénéité apparente de la couleur de ce profil, d'ailleurs exploité par la végétation à plus de 5 mètres ;
- l'existence de variations texturales sensibles, les horizons que l'on peut appeler B, présentant des teneurs en argile granulométrique de 28 à 35 % ;
- l'existence d'horizons supérieurs nettement plus pauvres en argile que ceux qui leur succèdent en profondeur ;
- la présence de "pseudo-sables" ;
- l'existence d'horizons à cohésion relativement plus forte (de 42 à 75 cm) ;
- le passage, en profondeur, à des niveaux où la ségrégation du fer devient progressivement plus importante.

TABLEAU N° A 1 - Profil CA 50 de Casamance: Description

Profondeur	Prélèvement	Description
0 - 3 cm:	501	Gris clair, sableux, structure nuciforme à grumeleuse. Cohésion faible, friabilité nette, très innervé par petites racines grossières. Porosité élevée.
5 - 15 cm:	502	Couleur gris-rougeâtre (2,5 YR 4/2). Texture sableuse très légèrement argileuse - Structure polyédrique moyennement développée, taille moyenne - cohésion faible, friabilité nette, macroporosité élevée - Activité biologique intense.
15 - 25 cm:		Transition progressive.
25 - 35 cm:	503	Rouge brun (2,5 YR 4/6). Sablo-légèrement argileux. Structure faible à moyennement développée, type polyédrique. Cohésion faible à moyenne plus élevée qu'au-dessus, macro-porosité élevée - friabilité nette en sec - transition progressive.
55 - 90 cm:	504	Rouge (légèrement humide), 2,5 YR 5/8 sec, sablo-moyennement argileux. Structure massive, débits variables. Cohésion moyenne à faible. Friabilité nette. Porosité tubulaire moyenne à bonne - riche en grains de quartz grossiers plus ou moins hyalins, présence de pseudo-sables de taille variable.
90 - 140 cm:	505	Rouge, 10 R 4/8, argilo-sableux, sables semblant plus fins ou alors pseudo-sables moins nombreux - massif. Cohésion de l'horizon nettement plus faible, friabilité très faible ou inexistante, enracinement encore important bien réparti, pseudo-sables encore différentiables, grains de quartz de différentes tailles, les plus gros généralement hyalins.
150 - 170 cm:	506	Couleur rouge 10 R 4/8, argilo-légèrement sableux argileux. Caractérisé par des revêtements brillants à l'intérieur des débits, moins net quand sec, gros quartz altérés avec infiltrations de fer rouge et ocre. La cohésion est la plus élevée du profil.
200 - 220 cm:	507	Horizon rouge 10 R 4/8. Argileux légèrement sableux, quelques revêtements argileux.
280 - 360 cm:	508	Couleur rouge 10 R 4/8, argilo-légèrement sableux à argileux. Revêtements argileux moins nets; présence de petites concrétions argileuses, revêtements à l'intérieur des canalicules; racines par endroits; nombreux grains de quartz, peu liés.
370 cm:	509	Début de bariolage, mouchetage exactement.
480 cm:	5010	Rouge brun 10 R 4/8, argileux, avec quelques zones bien délimitées gris verdâtres, parfois des sables blancs individualisés.

TABLEAU N° A 2 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL CA 50 -

- 12 -

N° Echantillon	501	502	504	505	506	507	508	509
Profondeur minimale en cm	001	10	60	100	150	200	280	370
Profondeur maximale	10	20	80	120	170	220	300	370

GRANULOMETRIE EN 10⁻²

Argile	9.50	11.5	25.2	49.4	51.2	51.3	47.9	50.2
Limon fin	4.6	4.7	3.0	3.3	6.2	5.7	6.4	8.9
Sable grossier	39.8	42.6	40.3	23.6	21.3	18.5	18.2	16.3

MATIERES ORGANIQUES EN 10⁻³

Carbone	13.1	9.00						
Azote	0.8	0.6						

ACIDITE

pH eau 1/2,5.....	6.3	6.3	4.7	5.0	5.1	5.1	5.4	5.3
pH Chlorure de K.	5.5	5.3	3.8	3.9	3.9	3.9	3.8	3.9

CATIONS ECHANGEABLES EN mc/100 g

Calcium		3.15	0.39	1.22	1.14	0.86	0.72	0.61
Magnésium		0.55	0.46	0.40	0.59	0.84	0.77	0.85
Potassium		0.06	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Sodium		0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03
S.		3.29	0.90	1.67	1.59	1.73	1.52	1.50
Capacité d'échange T. ...		4.65	3.50	3.60	4.10	3.15	2.85	3.55
V = S/T		71	25	46	39	54	60	42

ELEMENTS TOTAUX (Triacide) EN 10⁻² ET FER LIBRE

Perte au feu				7.30	7.35		6.65	
Résidu				48.5	44.2		49.6	
Silice				20.8	23.2		20.6	
Alumine				17.5	18.5		17.2	
Fer				3.75	4.25		3.75	
Titane				0.97	1.05		1.17	
Fer libre			1.60	3.17	3.15	3.49	3.09	3.36
SiO2/Al2O3				2.01	2.13			
SiO2/R2O3				1.76	1.85			

STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES HYDRIQUES

Instabilité structurale..				2.49		2.23		
Perméabilité Kcm/h				5.1				

Note: 501: échantillon remanié en surface.

c) Profil CC 68

Les profils précédents étaient situés en Moyenne et en Basse-Casamance. Le CC 68 est situé à l'est, en Haute-Casamance, près de Vélingara. Ce type de sol n'est représenté que sur de très faibles surfaces, en sommet de petits plateaux. Cependant le matériau originel est toujours le Continental terminal.

Description : Tableau n° A 6 (en annexe fin de la première partie).

Résultats analytiques : Tableau n° A 7 (en annexe fin de la première partie).

Les points importants qui apparaissent sont les suivants :

- le profil est homogène, au point de vue couleur et texture, de 60 cm à plus de 200 cm.
- de 0 à 53 cm les teneurs en argile granulométrique sont faibles. Ensuite elles croissent très progressivement avec la profondeur et un horizon de transition peut être défini entre 53 et 88 cm.
- Enfin, d'après la description faite sur le terrain, l'horizon 110 à 200 cm apparaît moins argileux que les précédents. Ce point est extrêmement important, il souligne une différence entre texture apparente et texture réelle et il fera l'objet d'études très précises plus loin.

d) Profil NR 2

Ce profil est situé dans la région de Nioro-du-Rip, au nord de la Gambie. Il est représentatif des sols "rouges" de cette région, situés sur de petites buttes très limitées géographiquement. Leur faible extension a été vérifiée par PIERI (1969).

Description simplifiée : Tableau n° A 8 (en annexe en fin de la première partie).

Analyses : Tableau A 9 (en annexe en fin de la première partie).

Les moins importants sont :

- la grande profondeur du profil aux transitions progressives ;
- la couleur rouge homogène (2,5 YR) jusqu'à plus de 340 cm et en fait jusqu'à 450 cm d'après les sondages.

- 14 -
- les textures de type sablo-argileuse, les taux d'argile granulométrique ne dépassant pas 20 % ;
 - la structure peu développée avec une cohésion assez forte, mais une friabilité encore perceptible ;
 - les rapports moléculaires silice-alumine inférieurs à 2,0

2) Au Dahomey et au Togo

Les sols rouges sont appelés "terre de barre" du mot portugais "barral" argile. Ils constituent une bande continue le long de la côte du Dahomey et du Togo, sur une largeur maximum de 120 Km. Le modelé est constitué de plateaux, entaillés par des vallées Nord-Sud, qui se terminent en biseau dans le sud-ouest du Nigéria. Comme au Sénégal, les roches-mères sont représentées par le Continental terminal. Deux profils sont présentés le N 13 et le NAK 2.

a) Profil N 13

Description : Tableau A 10

Résultats analytiques : Tableau A 11

Les points essentiels, ou particuliers, à souligner sont :

- la grande profondeur de la partie rubéfiée ;
- l'apparition de points ocres tout en bas du profil ;
- les taux d'argile qui dépassent légèrement 50 % entre 80 et 150 cm.

b) Profil NAK 2

Description : Tableau n° A 12 (en annexe en fin de la première partie).

Résultats analytiques : Tableau n° A 13 (en annexe en fin de la première partie).

Le profil a été creusé près de Cotonou, à Agonkamey, sous végétation dense arbustive, en position de plateau en pente faible. (WILLAIME et VOLKOFF, 1966).

Les données caractéristiques de ce profil sont :

- les teneurs très faibles en argile des horizons de 0 à 30 cm, et la transition assez brusque avec l'horizon suivant ;
- l'homogénéité de la coloration de 30 cm à plus de 400 cm ;
- la présence de quelques revêtements argileux ;
- la croissance très régulière des taux d'argile granulométrique entre 40 et 200 cm.

TABLEAU N° A 10

Profil N 13 du Dahomey: Description succincte.

Localisation - station agricole de Niaouli: Dahomey.

Topographie: Plateau légèrement en pente (2 à 3 %), au Nord de la station.

Végétation: assez dense à base de Cassia siméa.

Roche-mère: Continental terminal.

Description et prélèvements en Mai 1959: R. FAUCK.

Profondeur	Prélèvement	Description simplifiée
0 - 10 cm:	N 31	Horizon légèrement organique, couleur grise, texture sablo-argileuse, structure à tendance grumeleuse, légèrement humide.
10 - 50 cm:	N 32	Horizon brun rouge clair, texture sablo-argileuse, structure massive à cohésion faible, avec présence de pseudo-sables donnant un aspect friable en sec.
50 - 80 cm:	N 133	Couleur rouge vif, texture argilo-sableuse, présence de morceaux de quartz dans la masse rouge, et d'un bloc de grès grossier de 10x5x5 cm., très dur, avec des grains de quartz de taille irrégulière, quelques petits grains d'aspect roulés.
80 - 120 cm:	N 134	Couleur rouge vif, texture argilo-sableuse, structure massive, cohésion semble plus forte, mais à l'état nettement plus sec que la partie supérieure du profil.
120 - 400 cm:	N 136	(entre 180 et 200)
	N 137	(entre 300 et 320)
	N 138	(entre 340 et 350)
		Horizons homogènes, de couleur rouge, et de texture argilo-sableuse, apparemment légèrement moins argileux que l'horizon précédent, mais riches en quartz, plus riches en pseudo-sables identifiables à l'œil.
400 à 470 cm:	Sondage	Couleur rouge homogène, texture argilo-sableuse à sablo-argileuse (sur le terrain) apparition de petits points ocres et de grains de quartz grossiers dénudés.

TABLEAU N° A 11 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL N 13

Horizon	1.1	1.5	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26
Groupe	913	913	913	913	913	913	913	913
Sous-groupe faib. désaturé	9131	9131	9131	9131	9131	9131	9131	9131
Famille C.t.	17	17	17	17	17	17	17	17
Région: Dahomey	3417	3417	3417	3417	3417	3417	3417	3417
N° Echantillon	131	132	133	134	135	136	137	138
Profondeur min. en cm. ..	0.1	20	60	80	120	180	300	340
Profondeur maximale	15	30	70	90	130	200	320	350

GRANULOMETRIE EN 10⁻²

Argile %	22.0	35.0	49.6	51.5	52.0	44.5	37.5	42.5
Limon fin %	2.0	3.2	4.2	2.7	3.5	6.0	7.5	7.5
Limon grossier %	1.0	1.0	2.0	2.0	22.0	26.4	30.9	27.2
Sable fin %	24.0	19.0	20.9	17.0	22.0	26.4	30.9	27.2
Sable grossier %	51.0	40.0	26.3	23.0	21.7	22.5	23.2	22.5

MATIERES ORGANIQUES EN 10⁻³

Carbone	12.8	3.80		3.30				
Azote	0.87	0.42		0.22				

ACIDITE

pH eau 1/2,5	5.6	4.9	5.2	5.3	5.2	4.9	5.2	5.3
pH chlorure de K.	4.7	4.2	4.2	4.7	4.5	4.3	4.2	4.3

CATIONS ECHANGEABLES EN mc ET SATURATION %

Calcium	1.45	0.96		1.07				
Magnésium	0.70	1.10		0.70				
Potassium	0.17	0.19		0.13				
Sodium	0.06	0.08		0.08				
Somme des bases	2.38	2.33		1.98				
Capacité d'échange	5.12	4.25		4.47				
Taux de saturation % ...	46.5	54.5		44.5				

ELEMENTS TOTAUX (Triacide) EN 10⁻²

Perte au feu		5.73		7.31				
Résidu		62.5		46.3				
Silice		14.8		22.3				
Alumine		10.0		17.4				
Fer		4.1		5.8				
Titane		0.15		1.15				
Manganèse		0.02		0.02				
Calcium		0.18		0.17				
Magnésium		0.16		0.08				
Potassium		0.06		1.33				
Sodium		0.08		0.16				

FER LIBRE

Fe ₂ O ₃ en %	1.78	2.44		4.32				
---	------	------	--	------	--	--	--	--

3) En Haute-Volta

Un vaste secteur de sols rouges faiblement ferrallitiques a été signalé dans l'ouest de la Haute-Volta, formant une sorte de croissant entre Bobo-Dioulasso et Orodara. Ces sols sont développés sur un étage particulier de grès cambriens, les grès à yeux de quartz (JONQUET, 1963). Deux profils peuvent représenter les diverses familles de sols qui ont été reconnues : HFA et HF₃.

a) Profil HFA

Le profil HFA est situé dans la région d'Orodara. Le puits a été creusé presque en haut d'une longue pente, de plus de 2 km de longueur, et de déclivité moyenne de l'ordre de 2 %. En sommet de pente des fragments de grès démantelé apparaissent à la surface du sol.

Description : Tableau n° A 14

Résultats analytiques : Tableau n° A 15

De la lecture des données morphologiques et analytiques, nous retiendrons les points suivants :

- la partie rubéfiée d'apparence homogène dépasse 650 cm ;
- la limite inférieure du sol peut être définie par un matériau sableux ayant l'allure d'un grès en voie d'altération. Cette limite est à 8 mètres de profondeur ;
- la présence de pseudo-sables est notée dans tous les horizons, ainsi que la friabilité, en sec, de la structure ;
- l'augmentation progressive de l'argile granulométrique va de 8 % en surface à 45 % à 250 cm. Ensuite il y a décroissance très lente de ces taux, jusque 10 %, à 8 mètres de profondeur.

b) Profil HF₃

Le profil HF₃ est situé sur un plateau faiblement incliné, à l'ouest de Koussi. Aucun relief ne domine le modelé. La végétation est une jachère très dégradée.

Description : Tableau n° A 16 (en annexe en fin de la première partie).

Résultats analytiques : Tableau n° A 17 (en annexe en fin de la première partie).

- Profil HFA de Haute-Volta - Description simplifiée.

Situation: à 3 km d'Orodara sur la route de Mondon - Presqu'en sommet de crête.
Fait partie d'une série de profils sur une très longue pente de l'ordre de 2 % dénommée toposéquence de Orodara.

La description du profil est la suivante:

0 - 10 cm:	Couleur gris-rougeâtre 2,5 YR 4/4, texture sablo-légèrement argileuse, structure grumelo-particulaire, cohésion faible, macro-porosité élevée.
10 - 20 cm:	Transition progressive.
20 - 40 cm:	Couleur rougeâtre - 2,5 YR 5/8, texture sablo-argileuse à argilo-sableuse riche en sables grossiers, structure d'aspect massif à tendance polyédrique, cohésion faible à moyenne de l'ensemble.
40 - 70 cm:	Couleur rouge 10 R 5/8, texture argilo-sableuse, structure mal développée, à cohésion faible, caractérisée par une friabilité nette des débits.
70 - 200 cm:	Couleur rouge 10 R 4/8, texture plus argileuse que l'horizon précédent - structure mal développée, d'aspect continu, mais se résolvant soit en polyèdres soit en débits de taille petite à moyenne, de cohésion moyenne, avec toujours une friabilité nette, porosité importante mais fine, présence de pseudo-sables riches en quartz hyalins.
200 - 400 cm:	Couleur rouge 7,5 R 4/6, texture argileuse à argilo-sableuse (sables grossiers) structure à tendance polyédrique, porosité moyenne, présence de pseudo-sables, agrégation des quartz de grande taille dans une gangue rouge argileuse.
400 - 650 cm:	Horizon rouge 7,5 R 3/8, comparable au précédent, mais devenant humide (fin mai après six mois de saison sèche) aux environs de 5 mètres. Progressivement la texture devient de plus en plus sableuse tout en restant argilo-sableuse.
650 - 750 cm:	L'horizon de couleur rouge de fond, s'enrichit progressivement en produits jaunâtres, d'allure de grès altérés, texture sablo-argileuse, avec présence de secteurs nettement plus sableux et de couleur jaune clair, entourant des zones légèrement rouges - de texture sablo-argileuse à argilo-sableuse, de cohésion plus forte. On peut observer des gros quartz friables avec imprégnation diffuse de fer dans des canalicules ou des fentes.
800 cm:	Limite du sol, matériau sableux à l'allure de grès en décomposition.

TABLEAU N° A 15 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL HFA

Horizon	1.1	1.5	2.1	2.21	2.22	2.23	2.32	3.2
Groupe:moy.désat.	923	923	923	923	923	923	923	923
Sous-Groupe: modal	9231	9231	9231	9231	9231	9231	9231	9231
Famille:grès	40	40	40	40	40	40	40	40
Région:Hte-Volta	3240	3240	3240	3240	3240	3240	3240	3240
Numéro du sac.....	1.0	3.0	5.0	6.0	8.0	10.	14	20
Profondeur min. en cm. ..	0.1	40	100	150	250	350	550	850
Profondeur maximale	10	50	101	151	250	350	550	850

GRANULOMETRIE EN 10⁻²

Refus	0	0	0	0	3.0	11	6.0	2.0
Argile	8.00	35.7	38.6	41.5	44.9	44.1	29.5	10.6
Limon fin	1.3	2.5	3.0	3.9	6.6	7.0	7.7	2.0
Limon grossier	29.7	18.4	19.0	19.1	20.7	19.5	22.1	15.8
Sable fin)								
Sable grossier	61.0	43.4	39.4	35.5	27.8	29.4	40.7	71.6

MATIERES ORGANIQUES EN 10⁻³

Carbone	4.0	2.3	1.6	1.5	1.2	0.9	1.0	0.4
Azote	0.31	0.25	0.15	0.20	0.15	0.10	0.08	
Acides humiques	0.65	0.31						

ACIDITE

pH eau 1/2,5	5.8	4.9	5.1	5.3	5.4		4.5	5.0
pH CHL de K.	5.0	4.1	4.1	4.0	4.0		3.9	4.1

CATIONS ECHANGEABLES EN mé et SATURATION DU COMPLEXE

Calcium	0.83	0.30	0.32	0.18	0.56	0.45	0.35	
Magnésium	0.91	0.45	0.38	0.60	0.45	0.30	0.51	
Potassium	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	Traces	Traces	
Sodium	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.13	
Somme des bases	1.82	0.79	0.74	0.82	1.05	0.80	0.99	
Capacité d'échange	2.2	3.0	3.5	3.3	3.2	3.7	2.90	
Saturation %	82	26	20	25	33	21	34	

ELEMENTS TOTAUX (Triacide) EN 10⁻² ET FER LIBRE

Perte au feu			5.15	5.55	6.05	6.00	4.60	1.25
Résidu			60.1	56.0	52.3	52.7	62.5	88.9
Silice			15.9	17.0	18.6	18.5	15.1	5.35
Alumine			13.0	14.5	15.7	15.7	12.7	3.50
Fer			4.50	5.00	5.50	5.50	4.00	0.65
Titane			0.70	0.82	0.95	0.95	0.74	0.15
Calcium			0.12	0.09	0.17	0.20	0.14	0.06
Magnésium			0.09	0.10	0.10	0.08	0.05	0.02
Potassium			0.17	0.16	0.18	0.13	0.10	0.05
Sodium			0.11	0.11	0.15	0.10	0.15	0.10
Fer libre	1.13	3.30	3.80	4.15	4.50	4.66	3.43	0.81

De ce dernier profil il faut surtout retenir :

- la présence de fragments gréseux, parfois à l'allure de gravillons roulés ;
- la faible profondeur du sol. La partie supérieure rubéfiée fait place, à moins de 2 mètres, à un grès ferrugineux en voie d'altération ;
- les teneurs en argile inférieures à 30 % dans tout le profil.

4) Conclusions

Huit profils ont été décrits représentant les divers types de sols rouges inventoriés. Leurs traits essentiels ont été mis en évidence. Une grande similitude apparaît entre ces sols, pourtant très éloignés sur le plan géographique. Mais cette similitude concerne surtout la profondeur de la partie rubéfiée et l'homogénéité de la couleur. Des différences sont à retenir pour d'autres critères. Une comparaison systématique de toutes les caractéristiques morphologiques et analytiques s'impose donc avant de conclure que la similitude de l'ensemble des sols rouges est d'origine pédogénétique.

C - ETUDE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS

La présentation ci-après des faits et des résultats analytiques repose sur la comparaison d'une centaine de profils répartis dans les trois régions. Ces profils avaient été étudiés soit par nos soins, soit par divers auteurs. Il en est résulté une certaine hétérogénéité dans la masse des données recueillies. Dans ces conditions, afin de comparer valablement les résultats, une étude statistique complémentaire a été entreprise sur l'ensemble des profils en collaboration avec Van Den DRIESSCH. Les résultats obtenus sont présentés dans le texte lors de l'examen des caractères.

Dans toute étude pédologique, les différents critères morphologiques et analytiques des profils de sols sont classiquement définis par horizon. Le premier stade est donc la définition de ces derniers.

1) La différenciation en horizons

La succession des horizons des sols "rouges" telle qu'elle est définie sur le terrain est le plus généralement la suivante :

- a) un horizon humifère
- b) un horizon de transition
- c) un horizon rubéfié
- d) un horizon de passage aux roches-mères

1.1 - L'horizon humifère

Son épaisseur varie de 10 à 20 cm, selon les profils et surtout suivant leur couverture végétale. La couleur est grise à grise foncée. Deux sous horizons, A₁₁ et A₁₂, peuvent être parfois différenciés d'après l'intensité de la couleur. Le mélange matière minérale-matière organique est homogène, sauf dans de rares cas où l'hétérogénéité s'explique par un labour récent. Il n'y a pratiquement jamais de litière superficielle. Sous forêt dense, cependant, les 2 cm supérieurs sont d'une couleur nettement plus foncée. C'est le cas de quelques profils du sud-est du Dahomey. La texture sur le terrain est sableuse ou sablo-argileuse, avec de nombreux grains de quartz non recouverts. La structure est peu développée, avec une sous-structure à tendance

particulaire. La cohésion est variable. Elle est parfois assez élevée dans certains types de sols du Sénégal, en particulier ceux qui font la transition avec les sols ferrugineux tropicaux de couleur beige. La macro-porosité est élevée et d'origine intergranulaire. Dans certains cas, il y a présence de gravillons de grès roulés dans l'horizon supérieur. Leur origine est généralement retrouvée dans des affleurements gréseux situés en amont.

1.2 - L'horizon de transition

Il s'agit du passage entre l'horizon ou l'enrichissement en matière organique est visible sur le terrain, et l'horizon rubéfié homogène. L'épaisseur en est très variable, le plus souvent de 20 à 60 cm. Les transitions sont très progressives : d'une part la couleur de gris clair passe au rouge ; d'autre part la texture devient progressivement plus argileuse. Dans de rares cas, cet horizon n'existe pas et il y a brusque discontinuité. Mais l'étude de l'ensemble de la séquence de sols sur pente suggère alors la probabilité d'un phénomène érosif. Cependant, en Haute-Volta, cet horizon de transition est peu épais, alors qu'au Sénégal il est généralement assez profond.

1.3 - L'horizon rubéfié

L'épaisseur de cet horizon est grande, puisqu'elle dépasse cinq mètres dans de nombreux profils. Elle est presque toujours supérieure à deux mètres. A cette grande épaisseur s'ajoutent deux caractères, la couleur rouge, homogène, sans bariolage, et l'absence de concrétionnement ferrugineux. L'association de ces trois faits est une caractéristique essentielle de tous les sols rouges. Il est donc possible de considérer cet horizon comme "diagnostique" sur le terrain. Cependant, il est parfois possible de différencier certains sous-horizons, en se basant, soit sur de légères variations texturales, soit sur des modifications relatives de cohésion. Cette dernière, est parfois légèrement plus élevée dans la partie supérieure de l'horizon. C'est le cas de nombreux profils décrits au Sénégal.

Mais le caractère commun à l'ensemble de l'horizon, qui masque des différences de détail, reste cependant la couleur rouge homogène. Celle-ci est définie d'après le code Munsell, par la planche 2,5 YR, rarement par celle des

10 R, avec des chromas supérieurs à 4,0. Le code le plus utilisé est 2,5 YR 4 à 6/8. Les couleurs plus rouges (10 R) ont surtout été signalées au Dahomey, généralement dans des sols moyennement riches en argile. Certains cas de variations faibles de la couleur ont été notées dans des horizons rubéfiés. Il est à souligner alors qu'il s'agit toujours d'un accroissement d'intensité vers les niveaux les plus profonds. Un dépouillement comparatif des couleurs n'a pas permis de déceler une liaison avec les richesses en argile et en fer. Seul l'éclaircissement de la partie supérieure de certains profils du Sénégal est en corrélation avec la diminution du taux d'argile. Cet éclaircissement a d'ailleurs tendance à s'accroître du haut vers le bas des pentes (TOBIAS, 1965). Ces dernières observations sur la couleur nous conduisent à conclure que la rubéfaction est un phénomène qui semble se réaliser en premier lieu dans l'horizon B des sols. Il peut diminuer ensuite d'intensité dans certains horizons supérieurs appauvris. C'est donc un phénomène de profondeur, en relation avec le pédoclimat, et non un phénomène de surface des sols, en relation avec des données climatiques.

Pour caractériser l'horizon B, il faut aussi noter l'absence de concrétions ferrugineuses. Cependant des fragments de grès en voie d'altération ont été signalés dans toutes les régions. Dans certains profils argileux, des éléments nodulaires d'argile ont également été décrits. Il s'agit d'agrégats du type des pseudo-sables, mais de taille supérieure à 2 mm. Par contre, le type de texture ne peut être retenu comme caractéristique. La texture est variable selon les profils, bien qu'il s'agisse toujours de la gamme argilo-sableuse à argileuse. Dans les huit profils de référence, elle varie de 20 à 50 %. Cette texture est cependant assez constante dans chaque profil pris isolément, il n'y a pas de niveau net d'accumulation d'argile et les variations éventuelles sont toujours très progressives.

La structure de l'horizon rubéfié est du type continu, c'est-à-dire peu différencié, sans individualisation d'unités structurales nettement indépendantes. Certains auteurs ont parlé de structures polyédriques faiblement

développées à cohésion faible à moyenne, avec parfois tendance à une surstructure prismatique (JENNY, 1963). Les débris que l'on peut individualiser sont irréguliers, et présentent une friabilité nette à l'état sec, en rapport avec la présence d'agrégats de quartz et de ciment argileux rouge. Ces agrégats, déjà appelés "pseudo-sables", sont définis dans tous les horizons rubéfiés. Leur cohésion est moyenne, et ils se débitent en éléments texturaux plus petits par pression manuelle. La macro-porosité de l'horizon est bonne, d'origine essentiellement intergranulaire. Dans quelques profils du Dahomey, des revêtements argileux ont été signalés, mais toujours dans le cas des sols les plus argileux (WILLAIME, 1962 et 1963 ; SOGETHA, 1962 ; WILLAIME & VOLKOFF, 1966).

1.4 - L'horizon de passage aux roches-mères

Il y a plusieurs types d'horizons de passage du sol rubéfié aux roches-mères. Le plus courant est un niveau bariolé de couleurs rouges, ocres, blanches, jaunes, souvent en rapport avec la présence de fragments de grès ferrugineux en voie d'altération. Ce niveau bariolé passe, soit à des niveaux sableux non cohérents, de couleur claire, soit à des niveaux gréseux, riches en fer, et de cohésion parfois élevée. Dans ce dernier cas, les profils sont souvent peu profonds. Mais il y a également des niveaux où apparaissent des caractères de pseudo-gley : taches, concrétions ferrugineuses parfois soudées en carapace de nappe. Cependant, quel que soit le type d'horizon de passage, le critère essentiel de distinction est l'hétérogénéité de la couleur et de la cohésion, et la variation progressive de la texture avec la profondeur.

1.5 - Conclusions

L'exposé qui précède conduit à souligner la présence systématique d'un horizon que l'on peut considérer comme diagnostique des sols rouges sur le terrain. On peut également en déduire que les horizons supérieurs sont toujours moins riches en argile que cet horizon caractéristique, quelles que soient les origines géographiques des profils.

Dans ces conditions nous définirons les sols rouges par la succession suivante d'horizons :

- horizons supérieurs, que nous proposons d'appeler "appauvris" pour rappeler cette diminution relative systématique de la teneur en argile ;
- horizons rubéfiés, appelés B rubéfiés, ou simplement B, pour tenir compte du maximum de la rubéfaction et des teneurs en argile ;
- horizons de passage aux roches-mères, appelés C.

Les horizons peuvent être, selon les cas, subdivisés par l'utilisation des lettres. Ces dernières sont définies par le glossaire des pédologues. Il s'agit surtout de A₁₁ - A₁₂ et AB, pour les horizons appauvris. Les horizons B rubéfiés peuvent être, pour leur part, subdivisés en B₁ - B₂₁ - B₂₂ etc... et B₃, et les horizons C peuvent l'être en C₁ - C_g - C₂. Dans la suite du texte, nous utiliserons donc les mots "horizons appauvris", horizons B et horizons C. Le mot "matériau" sera parfois utilisé à la place de "matériau originel" ou de roche-mère.

La différenciation des sols rouges est donc relativement simple. Mais il faut souligner que sur des horizons C, très variés, de roches-mères en voie de transformation, il y a des horizons B qui se ressemblent beaucoup. La pédogénèse s'est traduite par une homogénéisation morphologique remarquable, renforcée par une couleur rouge typique. Le fait que cette couleur se développe ou s'intensifie, en profondeur dans les sols, est une donnée très importante. Elle indique que la rubéfaction n'est pas un phénomène né dans la partie superficielle des sols, en relation avec les seules données climatiques.

Enfin, l'étude a permis de souligner la grande profondeur des sols rouges. Mais il a parfois été difficile de préciser cette profondeur du fait de l'hétérogénéité des horizons C. Cependant huit à dix mètres sont des épaisseurs de sol courantes (MAIGNIEN, 1965). Les profils les plus épais ont tous été décrits dans les régions les plus humides, c'est-à-dire en Basse-Casamance (Sénégal), près d'Orodara (Haute-Volta), et dans le sud-est du Dahomey. Par opposition, il y a une relation entre faible épaisseur des profils, climats relativement plus secs, et diminution relative des sols rouges en superficie sur les modelés.

2) Les répartitions granulométriques

2.1 - Les méthodes d'étude

L'analyse mécanique, méthode classique avec dispersion au pyrophosphate, a été utilisée systématiquement. Cependant, des anomalies sont apparues lors de la comparaison des résultats avec les observations texturales faites sur le terrain. Ces dernières mentionnant généralement la présence de pseudo-sables, une liaison peut être faite entre ces différents faits. Les pseudo-sables apparaissent, en effet, comme des agglomérats de sables et d'argile et leur résistance à l'écrasement manuel peut expliquer les difficultés de dispersion lors des analyses. Pour éviter cette difficulté nous avons été conduits à effectuer des déferrifications préalablement à l'analyse mécanique. Pour certains profils, des différences notables ont alors été trouvées. Elles mettent en évidence la limite des interprétations possibles à partir des analyses mécaniques. Or, c'est à partir des résultats de ces dernières que sont souvent définies les notions d'horizons d'accumulation d'argile, et de lessivage des sols. C'est donc avec prudence que nous utiliserons les résultats qui n'ont pu être complétés par un test de déferrification.

2.2 - Les horizons supérieurs

Les taux d'argile granulométrique (0 à 2 microns), sont très variables mais le plus souvent compris entre 7 et 20 % dans les 10 premiers cm. Ensuite, il y a une augmentation progressive vers la profondeur. Dans certains cas, cette règle n'est pas respectée, mais des observations permettent alors d'incriminer l'existence de remaniements locaux. Cette augmentation systématique des teneurs en argile vers les horizons B, nous a incité précédemment à grouper, sous le nom d'appauvris, tous les horizons supérieurs à texture variable selon la profondeur (FAUCK, 1965). Cette notion d'appauvrissement a été également utilisée, mais dans un sens légèrement différent par AUBERT et SEGALEN (1966).

La profondeur Pa à laquelle les teneurs deviennent constantes est très variable. Au Dahomey, il y a une liaison entre texture et Pa car c'est dans les profils les plus sableux que Pa est le plus profond, atteignant 120 cm.

Dans les sols les plus argileux, Pa varie de 40 à 80 cm. Dans ces conditions, une notion de gradient de croissance par unité de longueur doit donc être ajoutée à celle de profondeur de l'appauvrissement. Elle ressort de la lecture du tableau n° A 18 qui concerne différentes séries de sols de la région d'Agonvy (Sud-Est Dahomey).

TABLEAU n° A 18 - Teneurs en argile dans les profils du Dahomey

Nom de la série	argile 0 - 10 cm	argile 40 - 50 cm	argile 120 - 140 cm
RBA	14,0	41,5	52,7
R	8,8	26,7	44,8
RS 1	6,7	11,2	34,3
RS 2	7,1	10,8	33,6

Les augmentations par unités de longueur ne sont pas toujours égales. Mais le cas le plus courant est une augmentation d'argile très rapide dans les 20 premiers cm, puis de plus en plus lente ensuite jusqu'au raccordement avec les horizons B. La progressivité de l'augmentation du taux d'argile a été suivie par STAIMESSE (1967) en étudiant des prélèvements très serrés. Dans le profil RS 31 de Basse-Casamance, les gradients sont assez variables selon la profondeur. La succession des textures est en effet la suivante :

Profondeurs cm	0-5	5-10	10-15	15-25	25-35	35-45	45-55	70-80
Taux d'argile	8,8	7,8	9,7	14,9	19,4	22,8	27,3	37,0

De leur côté, les teneurs en limon sont couramment comprises entre 1 et 5 %. Par contre, celles de sables fin Sf (50 - 200 μ) et sables grossiers Sg (200 à 2.000 μ) sont très variables. Cependant, les rapports Sf/Sg sont compris entre 0,9 et 2,3 dans l'état actuel de l'inventaire des sols. La présence de sables grossiers en proportion dépassant 20 % est donc également une caractéristique à retenir.

2.3 - Les horizons B

a) Les teneurs en argile

La grande majorité des profils contient de 30 à 45 % d'argile granulométrique. A l'analyse mécanique, les teneurs les plus élevées atteignent 55 %, mais pour un nombre restreint de profils. Cette limite supérieure des teneurs en argile est donc une donnée remarquable, dont il n'est pas possible de fournir une explication. De nombreux sols ferrallitiques sur des roches-mères variées peuvent contenir jusque 80 % d'argile. Or, même après déferrification, nous n'avons jamais obtenu de valeurs de plus de 60 % dans les sols sur grès. Les profils les plus argileux ont été décrits dans le Sud-Dahomey, alors que les sols les moins argileux ont été inventoriés dans les régions climatiques les plus sèches. Au Sénégal, c'est le cas de Goudiry (PEREIRA-BARRETO, 1967 et LEPRUN, 1967) et de Nioro-du-Rip (PIERI, 1969) où les textures des horizons B varient entre 20 et 36 %. En Haute-Volta, il en est de même (MOREAU et LEPRUN, 1969). Dans ce pays, les sols les moins riches en éléments fins correspondent à des secteurs où affleurent des cuirasses gréseuses. De plus, leur profondeur moyenne est nettement plus faible que dans les régions méridionales.

C'est dans les horizons B les plus argileux que des résultats divergents ont été notés selon la méthode analytique employée. Ainsi l'échantillon HF 37 de Haute-Volta contenait 23,4 % d'argile granulométrique, chiffre qui était assez différent des autres prélèvements effectués dans l'horizon B du profil HF 3. Après déferrification par HCl, la nouvelle détermination analytique (appelée parfois analyse corrigée) a fourni le chiffre de 53 %. Il s'agit cependant d'un échantillon exceptionnel, pour lequel la description mentionnait une allure de grès ferruginisé à altération incomplète. Mais toute augmentation des teneurs en argile par déferrification a toujours été mise en relation avec la présence de pseudo-sables. Par contre, il y a de très nombreux exemples où la déferrification n'a pas modifié les résultats, même quand la présence de pseudo-sables était signalée dans les descriptions. La présence quasi-générale de ces pseudo-sables à l'examen macroscopique est une caractéristique des horizons B. Mais nous faisons remarquer de suite qu'ils ont été observés dans d'autres types de sols. LEVEQUE (1966) les a appelés "éléments de néoformation de la granulométrie", et CHAUVEL et PEDRO (1967) "pseudo-particules". Compte tenu de leur importance, ces pseudo-sables feront l'objet, en seconde partie, d'une étude particulière.

b) Les variations relatives des taux d'argile

La limite supérieure des horizons B a été définie, sur le terrain, par la profondeur à partir de laquelle la texture devenait homogène. Tenant compte de l'existence des pseudo-sables il faut nuancer la notion d'homogénéité texturale de ces horizons rubéfiés. Dans beaucoup de profils, la teneur en argile déduite des "analyses corrigées" continue à augmenter vers la profondeur au niveau de l'horizon B. Le gradient d'augmentation par unité de longueur est cependant faible, et c'est pourquoi il n'est pas possible de définir un véritable horizon d'accumulation. Dans plusieurs cas, les courbes "taux d'argile X profondeur" présentent même "un ventre", qui, très étalé, peut représenter une augmentation de 5 à 8 % d'argile par rapport au sommet de l'horizon. L'existence de ce ventre a souvent été traduite par le symbole B₂ dans les descriptions. La limite entre horizon appauvri et horizon B est donc souvent l'endroit où il y a, non un arrêt de l'augmentation d'argile, mais une diminution brusque du gradient d'augmentation par unité de longueur.

En profondeur, la base de l'horizon B peut être marquée par une diminution progressive des taux d'argile, et sa limite est alors difficilement appréciable sur le terrain. C'est le cas lors du passage à des roches-mères sableuses ou sablo-argileuses.

Cependant, la règle de l'homogénéité relative des horizons B rubéfiés souffre quelques exceptions. Il y a des cas où des discontinuités brusques apparaissent dans les teneurs en argile des horizons rouges. Souvent ces variations concernent également les rapports sables fins-sables grossiers. Il est donc plausible de les attribuer à une forte hétérogénéité initiale des roches-mères transformées en sol, la rubéfaction, et la structuration, ayant masqué partiellement ces discontinuités.

c) Les limons et les sables

Les teneurs en limons fins (2 - 20 microns) sont toujours faibles, de l'ordre de 2 à 5 %, et le rapport limon-argile est inférieur à 20 %. Ce caractère est très courant dans les sols ferrallitiques. Dans les rares cas où des valeurs plus élevées ont été calculées, la déferrification a fait disparaître une bonne partie de ce que l'on peut appeler des "pseudo-limons".

Les teneurs en sables fins, Sf, et grossiers, Sg, varient beaucoup. Au Dahomey, certaines familles de sols ont pu être distinguées d'après le rapport entre les sables dans ces deux catégories. Mais, dans un même profil, il y a parfois des variations élevées de Sf/Sg dans les horizons B. C'est surtout en Haute-Volta qu'elles ont été relevées. Il semble parfois que les niveaux gréseux ont été mal digérés, des restes de gravillons de grès étant encore reconnaissables. On peut en déduire l'importance de l'hétérogénéité initiale des roches-mères, masquée ultérieurement par la rubéfaction et par l'enrichissement en argile.

Enfin, une tendance à l'augmentation relative du rapport sables fins/ sables grossiers peut être relevée, dans l'ensemble de la population des sols étudiés, en passant des horizons B aux horizons supérieurs. Cette observation est précieuse. Elle sera reprise en deuxième partie.

2.4 - Les horizons C

Dans les horizons C, la variabilité des types de granulométrie est extrêmement élevée puisque les roches-mères peuvent varier des sables aux grès argileux. Mais deux résultats peuvent être avancés :

- Dans le cas des roches-mères les plus sableuses, les teneurs en sables grossiers sont toujours importantes, souvent supérieures à celles en sables fins.
- Dans le cas des roches-mères argilo-sableuses, les teneurs en argile sont rarement supérieures à 35 %, le plus souvent inférieures à 20 %. L'hétérogénéité des horizons C comparée à celle, beaucoup moins grande, des horizons B, est donc un nouvel indice de l'importance de la pédogénèse dans l'homogénéisation des éléments fins de la granulométrie. Elle nous incite à rechercher les mécanismes d'une telle homogénéisation.

2.5 - Conclusions

L'étude de la répartition de la fraction granulométrique argileuse a aidé à préciser la définition d'horizons appauvris, proposée pour les horizons supérieurs. Elle a mis en relief trois résultats. En premier, la notion de gradient d'appauvrissement par unité de longueur, qui est en relation avec le type de texture ; en second, la grande profondeur de certains horizons ap-

pauvris. En troisième, le mode de variation des teneurs en argile dans les horizons B qui succèdent aux horizons appauvris. Cette étude a également souligné l'importance des pseudo-sables, dont la présence est caractéristique des horizons rubéfiés. Enfin, elle a permis de rapprocher certaines variations de texture des horizons B à des variations d'ordre climatique.

3) Les constituants organiques

Ils ont été caractérisés par les méthodes suivantes :

- Détermination de la matière organique totale, par dosage de carbone, méthode WALKLEY et BLACK (analyses de séries) et méthode ANNE (recherche);
- Détermination des fractions humifiées, par la méthode TIURIN, modifiée DUCHAUFOR (DUCHAUFOR 1960 et 1965). Les fractions déterminées sont :
 - H1 acides humiques libres
 - H2 et H3 acides humiques gris
 - F1 et F2 acides fulviques ;
- Détermination des rapports C/N après analyse de l'azote total par la méthode KJELDAHL.

3.1 - Répartition de la matière organique totale

La matière organique totale est répartie essentiellement dans les horizons supérieurs. L'horizon de surface A₁₁, le plus riche en matière organique, est épais de 5 à 12 cm. L'horizon A₁₂ qui lui succède, défini sur le terrain par une couleur grise moins foncée, ne dépasse guère la profondeur de 20 cm. Seules des activités biologiques (animaux fousseurs) expliquent la présence de produits organiques noirâtres plus profondément.

Les teneurs sont très variées, et elles sont en relation étroite avec le passé cultural, ou avec le couvert végétal. Ainsi, sous forêt sèche dense, la teneur en matière organique de l'horizon A peut dépasser 2 %. Dans les cinq premiers centimètres (A₁₁) elle peut atteindre exceptionnellement, surtout dans le Sud Dahomey, 3,0 à 3,5 %, les rapports C/N étant compris entre 10 et 15, ce qui indique une bonne décomposition. Par contre, sous culture, ou sous végétation de savane, les teneurs en matière organique totale dépassent

rarement 1 %. Les C/N sont parfois légèrement supérieurs à ceux trouvés sous forêt, mais la majorité des chiffres est comprise entre 12 et 16. Le rôle effectif d'un changement de végétation a été mis en évidence en Casamance. Par défrichement de la forêt, et mise en culture mécanisée, il y a eu diminution du stock de matière organique de 40 à 50 %, en l'espace de deux ans : FAUCK, MOUREAUX et THOMANN, (1969), CHARREAU et FAUCK (1970).

3.2 - Les fractions humifiées

Les taux d'humification sont le rapport entre le C des fractions humifiées et le C total. Au Dahomey, ces taux sont en moyenne de 20 % sous jachère, de 15 % sous culture ou très jeune jachère. Dans la région d'Agame, où les valeurs varient de 11 à 18 % une corrélation assez étroite existe entre les teneurs en humus total et la somme des bases échangeables (WILLAIME, 1962). Cette corrélation confirme donc l'importance de la fraction humifiée dans la fertilité des sols.

La répartition des diverses formes d'humus a été étudiée sur quelques profils du Sénégal (Melle THOMANN, 1964). Les acides humiques libres (H1) représentent 50 % de l'humus dans les horizons A₁₁ et A₁₂. Il y a donc formation préférentielle de ces acides humiques bruns, en surface. Mais, à un mètre de profondeur, ces derniers représentent encore 20 % de l'humus total. Cette dominance des fractions libres est confirmée par l'utilisation de la méthode électrophorétique (DABIN et Melle THOMANN, 1970), bien que de légères différences apparaissent avec cette technique. Il semblerait que le fer entrave la formation des liaisons humus-matière minérale et limite, indirectement donc, la création de fractions liées moins mobiles d'humus. Les acides humiques gris, fractions H2 et H3, sont considérés comme liés à l'argile. Ils ne représentent que 10 % du total seulement pour H2, et 8 % pour H3. Les acides fulviques (F1 et F2) sont en proportion relative de 6 % et 25 % dans les horizons de surface. Ils décroissent en quantité vers la profondeur, mais leur valeur relative augmente progressivement dans le total humifié.

3.3 - Conclusions

Les teneurs en matière organique sont assez faibles dans les horizons supérieurs des sols rouges, où elles sont intimement mêlées à la matière

minérale. Compte tenu des quantités de débris organiques apportés au sol chaque année, une minéralisation rapide de la matière végétale est donc probable. Cette minéralisation est accélérée dans certaines conditions de climat et de végétation.

Les fractions humiques libres sont très bien représentées en surface en valeur relative, mais la proportion des acides fulviques croît rapidement et fortement vers la profondeur. Cette dernière forme pourrait donc, théoriquement, être rendue responsable de certains phénomènes de migration (complexes ou chélates). Cette hypothèse retiendra notre attention ultérieurement.

4) Les caractéristiques structurales

Les méthodes utilisées pour caractériser l'état structural des sols ont été les suivantes :

- mesures de pF (potentiel capillaire) ;
- détermination de l'indice d'instabilité structurale (HENIN, GRAS et MONNIER, 1960) ;
- mesures de porosité ;
- détermination du coefficient K de perméabilité ;
- évaluation de la cohésion ;

Les résultats de ces analyses ou de ces tests seront interprétés avec prudence, la liaison entre les données au champ et les déterminations du laboratoire étant approximatives.

a) Stabilité structurale

COMBEAU et QUANTIN (1963) notent une relation entre le pF correspondant à la capacité au champ et la teneur en éléments fins du sol pour le cas de sols ferrallitiques. TERCINIER (1969) aboutit à des conclusions similaires, et ces conclusions nous incitent à accorder aux résultats de pF une valeur indicative. En théorie, l'humidité à pF 3 correspond approximativement à la capacité au champ. Les mesures de l'humidité à ce pF effectuées sur des échantillons en provenance de sols du Sénégal et du Dahomey sont très comparables. Les chiffres dépassent rarement 20 %. Mais une étude statistique a

montré que l'humidité à pF 3 est en corrélation positive significative avec les taux d'argile granulométrique des échantillons. Au Sénégal, la régression linéaire calculée est : humidité à (pF 3) = 0,27 argile % + 5,5. Pour un taux d'argile de 50 %, l'humidité à pF 3 atteint 20 %. Ce chiffre est de l'ordre de ce que donne TOBIAS (1965) sur l'humidité des sols rouges pendant le plein hivernage. Les différences entre les valeurs de l'humidité à pF 3 (capacité au champ) et de l'humidité à pF 4,2 (point de flétrissement) sont faibles. Elles sont comprises entre 2 et 3 % au Sénégal, et 3 à 4 % au Dahomey, pour les horizons B. Ces valeurs étant une évaluation de "l'eau utile", cette caractéristique peut donc représenter un facteur limitant pour l'utilisation des sols.

b) Indice d'instabilité

Les résultats concernant les prélèvements de surface sont très hétérogènes et difficilement interprétables. Dans le cas des horizons de profondeur, plus argileux, les valeurs de l'indice d'instabilité sont comprises entre 1,2 et 2,0 pour des sols de Casamance, entre 1,5 et 3,0 pour des profils du Dahomey. On peut donc considérer que la stabilité des sols est moyenne à bonne, selon les cas.

c) Porosité

Les résultats des mesures de porosité sont encore très variables pour les horizons de surface. Ils semblent essentiellement en rapport avec le passé cultural et le couvert végétal. Dans les horizons B, la porosité est toujours supérieure à 25 %, atteignant 45 % dans certains sols de Casamance. Ces valeurs sont supérieures à celles de la capacité au champ et ce résultat est à rapprocher de l'absence de traces d'engorgement dans les sols rouges. BALDENSPERGER et al. (1968) ont reporté les chiffres obtenus sur des échantillons de Haute-Casamance sur un graphique "porosité-humidité équivalente". Tous les chiffres se situent dans la zone du graphique dite "sans asphyxie". Ce résultat semble pouvoir être extrapolé à l'ensemble des sols étudiés. La bonne porosité des sols rouges est une caractéristique essentielle.

d) Perméabilité

Les coefficients de perméabilité (K) au Sénégal, mesurées au laboratoire sur échantillon de terre tamisée (HENIN et al., 1960) varient

de 3,5 à 5,0 cm/heure pour la grande majorité des prélèvements traités. Sur des échantillons en provenance du Dahomey la valeur K varie de 1 à 3 cm/heure dans les horizons sableux superficiels, de 2 à 5 cm/heure dans les horizons B pourtant nettement plus riches en éléments fins. Ces valeurs reportées sur un graphique $I_s \times K$, placent les sols "rouges" dans les sols "bien ou moyennement structurés (WILLATME et VOLKOFF, 1966). On peut donc considérer la perméabilité des horizons supérieurs et des horizons B comme moyennes à bonnes. Cependant le résultat le plus important est la constance dans le temps de cette vitesse d'infiltration K. C'est également à cette conclusion qu'aboutissent certains auteurs (CHAUVEL et TOBIAS, non publié) en utilisant la méthode de la station de Vergière (TOBIAS, 1968) : perméabilité sur cubes de terre non remaniés de 10 cm d'arête. Cette constance de la perméabilité est un fait important, en accord avec la stabilité de la rubéfaction dans les sols rouges.

e) Cohésion

L'appréciation de la cohésion a été faite par quelques mesures de résistance à la pénétration (CHARREAU et FAUCK, 1969). Les chiffres obtenus pour un profil de Casamance sont relativement élevés. Il semble qu'il ne soit pas possible de les extrapoler à d'autres cas. Aussi, une comparaison des observations de terrain sur la cohésion avec les teneurs en argile granulométrique a été tentée. En pratique, aucune liaison ne semble exister. Par exemple, les profils de Nioro-du-Rip (Sénégal), les plus sableux de tous, ont des cohésions relativement plus élevées en sec que certains sols argileux. Dans ces conditions, il est probable que la teneur en sables fins d'une part, et la richesse en pseudo-sables d'autre part, sont deux variables plus importantes que la richesse en éléments colloïdaux déduite de l'analyse mécanique.

f) Conclusions

Les divers résultats qui précèdent mettent en évidence trois caractéristiques importantes des sols rouges :

- la porosité forte
- la perméabilité relativement élevée
- la constance dans le temps de la perméabilité.

Ils sont à rapprocher de la présence d'une texture à pseudo-sables.

Ces derniers donnent aux sols un comportement plus sableux que celui déduit des résultats de l'analyse mécanique. Les qualités de bon drainage qui découlent de ces caractéristiques texturales sont probablement à l'origine de la rubéfaction intense des sols rouges, et de l'absence de caractères hydromorphes. Les mécanismes responsables de la création des pseudo-sables seraient donc à préciser car leur action conditionne le développement de caractères très importants de la pédogénèse.

5) Les données fournies par les analyses chimiques

Les données d'ordre chimique concernent les résultats obtenus par l'utilisation des méthodes suivantes :

- détermination des bases échangeables Ca, Mg, K, Na après extraction à l'acétate d' NH_4 et dosages par photométrie de flamme ou complexométrie ;
- détermination des bases dites "totales agronomiques" après attaque à l'acide nitrique ;
- détermination des bases totales par attaque triacide (DABIN, 1966) ;
- détermination des éléments Fe, Si, Al, Ti, Mn, par attaque triacide ;
- détermination des oligo-éléments.

Aux résultats de ces analyses nous raccrochons ceux de la détermination de la capacité d'échange T par Cl^2Ca . Les variables dérivées utilisées sont la somme des bases échangeables S et le taux de saturation V, rapport de S à T. Cette dernière valeur sera enfin rapprochée des mesures du pH, qui trouvent donc leur place logique dans ce paragraphe.

5.1 - Les bases échangeables et la saturation du complexe

5.1.1 - Dans les horizons supérieurs

Au Sénégal, la somme S des bases échangeables varie de 2,0 à 6,0 méq/100 grammes de sol. C'est le calcium qui est toujours l'élément cationique essentiel, de 60 à 80 % du total. Les teneurs en potassium échangeable, par contre, sont souvent très faibles, la moyenne étant inférieure à 0,05 méq %. Une carence en potasse en est généralement la manifestation sur

le plan agronomique. Le complexe absorbant humus-argile présente des taux de saturation V très variables, de 50 à 100 %. Mais c'est surtout la matière organique qui fixe les bases échangeables, les quantités d'argile étant souvent inférieures à 10 %. L'étendue de la variation des valeurs V, s'explique par la très grande hétérogénéité des horizons superficiels. A Séfa (Casamance) il a été observé que la somme des bases échangeables pouvait doubler sur quelques mètres. Cette variabilité est en relation avec le passé cultural, la présence de termitières, la micro-hétérogénéité en rapport avec des phénomènes érosifs.

Au Togo et au Dahomey, la somme des bases échangeables est très variable, mais elle peut atteindre 8 mé/100 gr sous forêt dense dans le sud-est du Dahomey. Cette richesse est souvent complétée par celle de nombreux tortillons de terre déposés en surface par les vers. Ces tortillons ont des teneurs en bases échangeables de 15,7 mé contre 5,1 mé % pour l'horizon qu'ils surmontent. Un tel exemple montre l'importance des remaniements d'ordre biologique pour la fertilité ou même la pédogénèse. Cependant, dans les régions très anciennement cultivées, Lomé et Porto-Novo en particulier, la valeur S est toujours inférieure à 3 mé %. Il en est de même au Nigéria (VINE, 1959). Selon les conditions de richesse en bases échangeables, les taux de saturation du complexe sont évidemment très variables. Mais les pH eau leur sont en étroite corrélation, variant de 6,5 à 7,5.

En Haute-Volta, le total des bases échangeables dépasse rarement 3 mé % en surface et les taux de saturation sont pour la plupart inférieurs à 70 %. La richesse chimique des sols est donc relativement plus faible qu'ailleurs. Le type de couverture végétale, généralement très ouvert, est probablement une des explications possibles.

5.1.2 - Dans les horizons B

a) Les bases échangeables

Les résultats sont moins dispersés que dans les horizons de surface. La somme S des bases est comprise entre 1,0 et 3,5 mé %, avec une dominance de l'ion Ca, sauf dans quelques cas où les valeurs sont faibles, et où le Mg se trouve à un niveau comparable à celui du Ca. De plus, il y a une relation cer-

taine avec les teneurs en argile granulométrique. Ainsi au Sénégal, le rapport S/taux d'argile reste compris entre 6 et 8 mé/100 gr dans l'ensemble des horizons rubéfiés. Cependant, dans de nombreux profils, cette charge en bases du complexe granulométrique argileux présente deux variations :

- un minimum dans l'horizon de transition sous l'horizon organique ;
- un maximum relatif, plus ou moins accusé, à une certaine profondeur, souvent entre 3 et 4 mètres.

b) La capacité d'échange T

Les capacités d'échange sont comprises entre 3 et 8 mé % et elles sont en relation étroite avec les teneurs en éléments argileux. Dans ces conditions, la fraction granulométrique de 0 à 2 microns possède une capacité d'échange de 10 à 16 mé %, avec un mode voisin de 15 mé %. Dans le sud-est du Dahomey, la corrélation calculée entre les valeurs de T et les teneurs en argile est hautement significative (pour $n = 36$). Des valeurs plus élevées ont été indiquées dans certains profils au Togo (MILLETTE et VIEILLEFON, 1967). De même à Agame (ouest du Dahomey), les chiffres avoisinent 23 mé %. Il est possible que ces anomalies des valeurs de T par rapport à l'argile, puissent être mises en liaison avec une richesse exceptionnelle en hydroxydes de fer, ou avec la présence de minéraux altérables.

c) Les taux de saturation V

Les valeurs des taux de saturation V présentent des différences assez nettes selon les régions. Au Sénégal, elles sont comprises entre 40 et 50 %, avec un mode (fréquence maximum) de 47 % en Basse-Casamance. Quelques chiffres nettement plus faibles, compris entre 30 et 55 % ont été trouvés à Nioro-du-Rip, soit dans les régions nettement les moins arrosées. Au Dahomey, la plupart des taux de saturation sont compris entre 40 et 65 % sans qu'une relation nette puisse être décelée avec les données climatiques. Ces valeurs justifient le classement des sols en ferrallitiques faiblement désaturés (AUBERT et SEGALEN, 1966). Cependant, des cas de taux de saturation compris entre 30 et 40 % dans les horizons B ont été cités dans la littérature.

En Haute-Volta, les valeurs sont nettement et systématiquement plus faibles qu'au Sénégal et au Dahomey. Elles sont comprises entre 25 et 45 %, justifiant un classement en ferrallitique moyennement désaturé. Certains profils peuvent même avoir des taux de saturation de l'ordre de 20 % dans les horizons profonds, en particulier ceux de passage à l'horizon C.

d) Les valeurs du pH

Au Sénégal, les déterminations des pH eau, sont groupées entre 5,0 et 5,5 avec des modes de 5,4 pour la Basse-Casamance, et de 5,2 pour la Haute-Casamance. Les mesures du pH KCl sont nettement plus basses, de 3,7 à 4,4, avec des modes respectifs de 4,0 et 4,2. Ces différences entre les deux catégories de pH indiquent un milieu peu tamponné, de type sableux. La texture riche en pseudo-sables en est probablement la raison essentielle.

Au Dahomey, les pH eau varient de 5,2 à 5,8, avec comme valeurs extrêmes 4,9 et 6,4. Les pH KCl leur sont toujours inférieurs de 0,6 à 0,7 unité.

En Haute-Volta, les pH des horizons B sont compris entre 4,5 et 5,0, soit des valeurs plus faibles qu'ailleurs. Ce résultat concorde exactement avec celui sur les taux de saturation.

5.2 - Les éléments totaux

5.2.1 - Définition et méthodes

Nous entendons sous le nom d'éléments totaux, la liste suivante : Si - Al - Fe - Ti - Mn - Ca - K - Mg - Na auxquels s'ajoutent les oligo-éléments.

La méthode d'extraction et de dosage a été celle de l'analyse triacide. Toutes les déterminations ont été faites par le laboratoire de chimie des S.S.C. à Bondy. Dans le cas particulier de l'élément fer, des analyses dites de "fer libre" par la méthode d'HOORE ont été effectuées pour la plupart des études. C'est pourquoi leurs résultats seront présentés en même temps que ceux du "fer total".

Trois variables dérivées ont été utilisées. La première est le rapport SiO_2/Al_2O_3 , la seconde le rapport SiO_2 /sesquioxydes, la troisième le rapport fer/argile. Le premier rapport, K_i , est interprété comme indiquant le type de la liaison silice-alumine de l'argile. On en déduit également la possibilité de présence ou non d'alumine libre.

5.2.2 - Le silicium et l'aluminium

L'analyse triacide donne une évaluation de la silice combinée, sous forme d'argile minéralogique, et de silice non combinée. Cette dernière peut être assimilée au quartz résiduel. Les teneurs en quartz correspondent à peu près au pourcentage total des sables fins et grossiers fournis par l'analyse mécanique. Elles varient de 50 à 90 %. Les teneurs en Si combinée sous forme de silicates varient de 8 à 24 % dans les sols du Sénégal, de 2 à 23 % dans ceux du Dahomey. Les teneurs en Al combinée varient de 10 à 20 % au Sénégal et en Haute-Volta, de 1 à 18 % au Dahomey.

Les rapports moléculaires $K_i = SiO_2/Al_2O_3$ sont, à 95 %, compris entre 1,7 et 2,1. Les moyennes calculées dans les différentes populations régionales de sols indiquent des modes voisins de 1,9. C'est le cas au Sénégal, en particulier en Casamance, où $K_i = 1,90 \pm 0,09$ pour $n = 13$. Cependant quelques chiffres plus faibles (de 1,5 à 1,8) ont été trouvés dans des profils de Nioro-du-Rip. Il s'agit des prélèvements les plus sableux qui ont été étudiés et dans lesquels l'analyse est beaucoup moins précise. Au Dahomey, au Togo et en Haute-Volta, 90 % des rapports K_i sont compris entre 1,7 et 2,0, quelques chiffres de 1,5 et 1,6 ont été recensés. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 voisin de 2,0 indique que la kaolinite est le type essentiel d'argile. La corrélation élevée qui est relevée entre teneurs en Al_2O_3 et quantités d'argiles granulométriques, et le rapport de 1/2,50 entre les deux séries de résultats, confirme de façon indirecte qu'il s'agit sûrement d'une argile uniquement kaolinique.

Bien que les variations du rapport K_i soient faibles, un regroupement des valeurs en fonction du climat a pu être opéré au Dahomey. Dans le sud-est où quelques valeurs de K_i de 1,5 à 1,6 ont été notées sur des sols argilo-sableux, la pluviométrie est supérieure à 1.200 mm. Dans le sud-ouest, où il y a des K_i de 2,0 à 2,2, la pluviométrie annuelle est inférieure à 1.000mm. Il n'est pas possible pour l'instant de faire plus qu'une simple constatation. Enfin, les rapports $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sont assez variables. Ils sont compris entre 1,3 et 1,9 au Sénégal, 1,2 à 2,5 au Dahomey.

a) Valeurs absolues

Les quantités de fer total (triacide) varient de 1 à 6 % dans l'ensemble des profils. Dans les horizons B, la plupart des teneurs s'étagent entre 2,0 et 4,5 %. Ces valeurs sont relativement faibles, ou moyennes, pour des sols situés dans les régions tropicales. En effet, dans beaucoup de sols ferrallitiques, les quantités de fer total peuvent dépasser 10 %. Sur granite, en se limitant aux seuls sols classés faiblement ferrallitiques, les valeurs de 6 à 8 % sont courantes, et une moyenne de 4,3 % a pu être calculée sur 23 échantillons. Pourtant, une bonne partie de ces sols n'a pas l'intense rubéfaction des sols rouges sur grès. C'est dire que la rubéfaction a pu se développer de façon caractéristique dans les sols sur grès, même pour des teneurs en fer relativement basses. Les différences régionales sont faibles. Les teneurs en fer total des horizons B des sols du Sénégal varient de 2,0 à 5,5 %. Au Dahomey, la moyenne est de 3,2 % pour $n = 71$ avec pour extrêmes 1,0 et 5,6 %. En Haute-Volta, les valeurs trouvées ne sont pas significativement différentes.

Dans les horizons supérieurs, les teneurs sont systématiquement plus faibles que dans les horizons B précédents, quel que soit le profil ou la région. Ces horizons supérieurs sont donc également appauvris en fer, cette notion d'appauvrissement étant, pour l'instant, la constatation d'un état de fait. Dans les horizons profonds C, la variabilité statistique des résultats est élevée. Dans certains cas, (Haute-Volta), les niveaux sableux des roches-mères contiennent moins de 0,5 % de fer. Dans d'autres, (grès de Casamance), ils en contiennent jusque 6,5 %. Il est remarquable que de telles valeurs ne soient que rarement relevées dans les profils de sols eux-mêmes.

b) Valeurs relatives

Ces teneurs en Fe ont été rapprochées de celles de Si et de Al. Les rapports Fe/Si et Fe/Al sont constants dans les horizons B de chaque profil pris isolément. En fait, ils traduisent la constance du rapport fer total/argile granulométrique. Cette constance est une caractéristique remarquable dans chaque profil. Dans l'ensemble de ces derniers, les rapports moyens s'étagent entre 6,0 et 12,0. La plupart se situent cependant entre 10,0 et 11,3 dans les sols les plus profonds et les plus argileux. Dans les horizons supérieurs, plus sableux, ces valeurs peuvent dépasser 12 % et atteindre même 16 %.

c) Fer libre

Mais le fer total est une donnée difficile à interpréter. Il peut représenter des formes très variables, incluses dans des structures, ou bien libres, et à ce moment soit à l'état cristallisé, soit à l'état amorphe. Cette notion de "fer libre" est intéressante car elle indique théoriquement la fraction susceptible d'être mobilisée, liée, transportée. L'importance pédogénétique de ce fer dit "libre" a conduit la plupart des auteurs à en préciser les teneurs, parfois avec méthodes d'analyse assez différentes. Les valeurs sont variables, mais le fait remarquable est la constance du rapport fer libre/fer total dans les horizons B pris isolément. Dans l'ensemble de la population de prélèvements, ce rapport est en moyenne de 0,80. Pour l'instant, la seule interprétation possible est que l'importance en valeur relative de ce fer libre doit correspondre à un type d'organisation bien défini du fer et des éléments colloïdaux argileux. Mais il n'est guère possible d'aller plus loin sans rechercher les formes exactes de ce fer libre. C'est ce qui sera tenté en deuxième partie.

5.2.4 - Les éléments Ca, K, Mg, Na

A la détermination des quantités de Ca, K, Mg et Na, dites généralement bases totales, par l'analyse triacide, s'est ajoutée parfois une détermination après simple attaque nitrique. Ces bases "totales nitriques" sont considérées comme représentant les éléments en réserve utilisables sur le plan agronomique.

Au Sénégal, les sommes des bases totales varient de 14 à 17 mé % en surface et de 6 à 10 mé % en profondeur. Dans tous les cas, les bases totales nitriques sont sensiblement inférieures à celles obtenues par attaque triacide. En moyenne, la charge en bases totales est de 0,5 % de la quantité d'argile granulométrique. Au Dahomey, une étude systématique a été faite. Le tableau N° A 19 récapitule la comparaison des formes nitriques et triacides avec les bases échangeables.

mé/100 g	Horizons de surface			Horizons B		
	Echan-geable	Total nitrique	Total triacide	Echan-geable	Total nitrique	Total triacide
Ca	4,52	6,86	11,8	1,8	-	7,5
Mg	1,5	1,7	4,9	0,8	-	7,4
K	0,17	0,26	1,27	0,15	-	1,49

En général, les quantités de bases totales pour 100 grammes de sol sont donc relativement faibles, et les bases échangeables peuvent en représenter jusque 30 %. Cela indique :

- d'une part, une réserve faible en éléments susceptibles de passer à l'état assimilable pour les plantes.
- d'autre part, la présence de bases non échangeables, c'est-à-dire la possibilité d'éléments bloqués dans des structures résistantes à l'attaque par Cl_2Ca , en particulier dans des minéraux non complètement altérés.

5.2.5 - Les éléments divers

Le titane est dosé dans tous les prélèvements, en quantités variant de 0,5 à 1 %. Les chiffres supérieurs à 1 % sont rares, par contre ils sont souvent de l'ordre de 0,1 % dans les roches-mères sableuses. Bien que les quantités soient faibles, le titane représente cependant un élément important, qui peut être utilisé dans l'étude des bilans.

Complémentairement au manganèse total (triacide ou fusion alcaline), les formes de Mn échangeable et de Mn facilement réductible ont été dosées sur certains prélèvements. Les quantités sont très faibles, le Mn total ne dépassant pas 0,2 pour mille. Cet élément ne s'accumule donc pas dans ces sols particulièrement bien drainés.

Des résultats fragmentaires ont été recueillis pour les oligo-éléments. Les teneurs sont de l'ordre, ou inférieures, au ppm. Ainsi pour un échantillon du Sénégal : Zinc : 2 à 3 ppm, Vanadium : 0,1, molybdène : 0,01, cuivre : 0,1 à 0,4 cobalt : 0,01 à 0,1 ppm. PINTA et OLLAT (1961) ont étudié plus en détail le profil N 13 du Dahomey. Ils indiquent :

- de très faibles teneurs en Mo et Cu
- des accumulations localisées de Mn et de Bo dans l'horizon organique, de Pb, Ca, Va et Cr entre 100 et 200 cm, de Ni et Cu en-dessous de 200 cm.

L'étude précédente nous conduit à admettre la possibilité de l'accumulation différentielle des oligo-éléments, à des niveaux variables dans les horizons B. Cette observation incite donc à resserrer les prélèvements de terre effectués dans ces horizons B, apparemment homogènes, pour y déceler des accumulations ou des appauvrissements éventuels. L'étude de la charge en bases échangeables de l'argile nous avait déjà fait apparaître cette possibilité.

5.3 - Conclusions

Les caractères essentiels des sols rouges peuvent être résumés ainsi pour ce qui concerne les données d'ordre chimique :

- il y a une bonne homogénéité des valeurs de la saturation en bases dans les horizons B, pour chaque région prise isolément. Cependant les profils de Haute-Volta sont nettement plus désaturés que ceux du Sénégal et du Togo-Dahomey.
- il y a une grande hétérogénéité des teneurs en bases échangeables, des valeurs des taux de saturation et des pH dans les horizons de surface. Cette hétérogénéité a été mise en rapport avec le passé cultural et le type de couverture végétale. Par contre, les différences de saturation notées précédemment dans les horizons B s'expliquent plus difficilement. Les roches-mères, le climat, l'âge des sols, le modelé, autres facteurs du milieu, peuvent être la cause de cette différenciation.
- la richesse en quartz est élevée dans tous les horizons, car elle dépasse 50 %
- le rapport SiO_2/Al_2O_3 est compris entre 1,7 et 2,1, et en moyenne il est de 1,9
- les teneurs en fer sont généralement inférieures à 5 % malgré une rubéfaction intense.
- les rapports fer/argile granulométrique sont constants dans les divers niveaux des horizons B pris isolément.

6) Les minéraux argileux et les hydroxydes

6.1 - Les méthodes

Leur étude a déjà été abordée indirectement lors de la détermination des éléments qui les constituent, Fe, Si et Al. Les méthodes employées pour leur évaluation directe ont été les suivantes :

- diffractométrie par les rayons X
- analyse thermique différentielle

Les analyses ont été effectuées en partie par le laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg (interprétation par Hélène PAQUET), en partie par le laboratoire de physique des sols de l'ORSTOM, Bondy (interprétations PINTA et Melle FUSIL).

- photographies au microscope électronique, effectuées au laboratoire de Géologie de Strasbourg (SIEFFERMANN et WEBER).
- observations sur plaques minces de sols et de roche-mère (laboratoire de géologie du Centre de Dakar, et laboratoire de géologie des SSC, Bondy par Mme DELAUNE.

Les résultats, déduits de l'utilisation complémentaire de ces diverses méthodes, sont les suivants :

6.2 - Les minéraux silicatés

La kaolinite est le minéral argileux essentiel de tous les sols rouges, et également des matériaux divers issus des roches-mères gréseuses. La présence exclusive de ce minéral avait été signalée par GUILCHER (1959) dans le cas des terres de barre. Cette kaolinite est particulièrement bien cristallisée, surtout dans les horizons B rubéfiés (MILLOT, 1964). Toutefois, les pics sont généralement moins beaux dans les horizons supérieurs. Cependant, l'élimination de produits amorphes par différentes méthodes (HCl 8 N, lavage NaOH 0,5 N en particulier) modifie les diffractogrammes, et augmente la hauteur des pics. Il n'y aurait donc pas diminution de la cristallisation de la kaolinite, mais masquage par des produits amorphes. Au microscope électronique, les hexagones des minéraux kaolinitiques sont intacts, souvent entourés d'hydroxydes de fer

plus ou moins nets. Dans tous les exemples étudiés, les unités hexagonales sont de petite taille, inférieure à 0,5 micron. Cette présence exclusive de kaolinite explique que les rapports SiO₂/Al₂O₃ soient très voisins de la valeur théorique 2,0. Les calculs de la quantité de kaolinite en utilisant les teneurs en SiO₂ et Al₂O₃ de l'analyse triacide fournissent des chiffres que nous appellerons dans la suite "kaolinite théorique". Ces chiffres sont voisins de ceux obtenus pour l'argile granulométrique (analyse mécanique). Cependant, il y a parfois des différences nettes qui sont en rapport avec la présence de pseudo-sables, la dispersion de l'argile ayant été insuffisante.

La capacité d'échange de la kaolinite est en théorie de 10 à 12 mé %. Or, nous avons vu précédemment que les déterminations de la capacité d'échange de la terre fine, dans les horizons A et B, donnent des chiffres de 10 à 16 mé %, avec un mode voisin de 15 mé %. Ces valeurs, un peu élevées, pourraient s'expliquer aussi par la présence de pseudo-sables, riches en hydroxydes et par le mode particulier de liaison du fer et de l'argile.

L'illite a été citée souvent dans les interprétations de RX, mais toujours à l'état de traces. On la trouve en particulier dans les horizons profonds des sols et dans les matériaux originels, que ce soit au Sénégal, au Dahomey, ou plus rarement en Haute-Volta. Ces illites sont la plupart du temps transformées en édifices gonflants de type I - (10-14_M) - M. (H. PAQUET). Ce seraient des résidus d'altération des illites des roches-mères, résidus qui auraient subsistés, peut-être du fait d'une protection par des composés amorphes.

Dans les horizons A et B il n'y a pas de traces de minéraux en voie d'altération. Pourtant des feldspaths ont été observées dans les horizons C de Haute-Volta et surtout dans les roches-mères. Les grès de ce pays sont en effet feldspathiques, mais leur altération semble déjà très poussée dans les niveaux qui se trouvent actuellement sous les sols. Quand ces grès affleurent tous les minéraux altérables ont disparu (DARS, 1961).

6.3 - Les hydroxydes

Les hydroxydes de fer reconnus sont l'hématite et la goethite. Ils sont identifiés dans beaucoup de prélèvements mais toujours en quantités très faibles. Pourtant, dans certains profils contenant de 4 à 5 % de fer, les analyses physiques, RX et ATD, ne les ont que difficilement mis en évidence. Il

est donc logique de penser à la présence de composés amorphes en quantités importantes. Cette conclusion orientera nos recherches en seconde partie, lors de l'étude de la rubéfaction. Notons que la goethite a surtout été décelée dans les horizons supérieurs, et l'hématite dans les horizons profonds.

L'utilisation du séparateur de FRANTZ (en collaboration avec PELLOUX) met en évidence une fraction de sables magnétiques. Cette technique indique donc la présence de fer sous forme de magnétite.

Les hydroxydes d'alumine, en particulier la gibbsite, n'ont pas été décelés. Cependant la présence d'alumine non cristallisée n'est pas exclue. Le fait que les rapports SiO_2/Al_2O_3 sont de l'ordre de 1,9 en indique la possibilité théorique. MILLETTE et VIELLEFON (1967) ont effectué les dosages chimiques d'alumine libre dans des terres de barre du Togo. Mais les quantités trouvées sont toujours inférieures à 2 %.

6.4 - Conclusions

Les déterminations des éléments totaux, des minéraux argileux et des sesquioxydes, ont mis en évidence les caractères suivants qui sont communs à tous les sols "rouges" :

- richesse en quartz, qui constitue de 50 à 90 % du squelette du sol ;
- présence exclusive de kaolinite très bien cristallisée ;
- présence d'hydroxydes de fer, sous forme cristallisée, et aussi sous forme amorphe. Mais les teneurs en fer ne sont jamais très élevées malgré la forte rubéfaction ;
- relation étroite entre les quantités de fer dit "libre" et les taux d'argile granulométrique ;
- inexistence, ou faibles quantités, de produits alumineux non silicatés.

Ces caractères ne sont évidemment pas spécifiques aux sols "rouges" sur grès.

7) Les caractéristiques microbiologiques

Les études faites (DOMMERMUES, 1959 et 1963, MOUREAUX, 1967) concernent surtout les horizons de surface de profils de Casamance. Les résultats montrent une grande variabilité en fonction du niveau de fertilité et du passé cultural. Pour les sols les plus riches, sous forêt dense de Casamance, l'activité microbiologique est classée comme élevée, caractéristique d'une grande rapidité de rotation des éléments nutritifs. Cette dernière est liée à une minéralisation rapide du stock organique (MAGNIEN, 1959 a). La richesse minérale globale, déterminée par le test à l'*Aspergillus Niger*, est faible, et les fixateurs d'azote atmosphérique (BELJERINCKA INDICA) sont rares. En profondeur, la chute d'activité est rapide, particulièrement pour l'indice glucose (MOUREAUX, 1967). La caractérisation microbiologique des sols met donc en évidence une minéralisation rapide de la matière organique. Ceci est en accord avec toutes les observations faites sur le bon drainage, la bonne porosité et la bonne aération des sols rouges.

D - CONCLUSIONS

La présentation des sols "rouges" a mis en évidence un certain nombre de caractères qui leur sont communs. Les principaux sont les suivants : sur le plan morphologique, il s'agit de la succession d'horizons appauvris et d'horizons B rubéfiés profonds, ainsi que de la présence de pseudo-sables modifiant la texture apparente. Sur le plan analytique, ce sont essentiellement la richesse en quartz, la présence exclusive de la kaolinite, la relation étroite entre les quantités de fer et d'argile.

Cependant, certains des caractères précédents ont été décrits dans les horizons C et dans les matériaux originels. Leur acquisition ne serait donc pas le fait exclusif de la pédogénèse. Pour définir celle-ci il est donc nécessaire de faire le tri de ce qui peut être hérité des roches-mères. Mais ces dernières, quelles que soient leurs compositions, n'ont évolué en sol que dans certaines conditions de milieu. Ce sont donc ces conditions de milieu que nous allons caractériser en premier lieu.

CHAPITRE II

LES FACTEURS DE DIFFERENCIATION DES SOLS

Généralités

Les facteurs, dont l'action conjuguée peut expliquer le mode de différenciation des sols, sont les suivants :

- le climat, en particulier la quantité, l'intensité et la répartition des pluies ;
- les matériaux originels sur lesquels les sols se sont développés et en particulier leurs caractères pétrographiques, et leur état d'altération ;
- les caractères géomorphologiques, c'est-à-dire le type de modelé et la position des sols sur ce modelé ;
- les actions biologiques, soit "externes" comme celles de l'homme, soit "internes" comme celles des termites, des fourmis, des vers, des microorganismes.

Nous aborderons successivement l'examen de toutes ces données.

A - LES DONNEES CLIMATIQUES

1) Les différents climats

Les climats des trois régions étudiées peuvent être définis par un certain nombre de variables, en particulier pluviométrie, température, évaporation, humidité relative. Mais il est apparu que les informations disponibles étaient de valeurs inégales selon les contrées. Après examen plus poussé, nous avons été amenés à fonder la caractérisation des différents climats essentiellement sur les critères de pluviométrie : quantités et répartitions dans le temps.

1.1 - Au Sénégal

Le tableau N° A 20 regroupe les principaux résultats météorologiques des stations situées dans les secteurs où nous avons signalé des sols rouges.

TABLEAU N° A 20 : Conditions climatiques au Sénégal

	P. annuelle	T°	p.m.
OUSSOUYE	1.787		552
ZIGUINCHOR	1.645	26°7	538
BIGNONA	1.300 - 1.400		
SEFA	1.302	27°4	449
KOLDA	1.196	27°7	374
VELINGARA	1.096		327
NIORO-DU-RIP	950	27°8	368
GOUDIRY	832	27°9	274

P. : Pluie annuelle moyenne de x années
T° : Température moyenne annuelle
p.m. : Pluviométrie du mois le plus pluvieux de l'année

Les variations de la pluviométrie sont importantes, allant du simple au double. Mais dans tous les cas, il s'agit d'une seule saison des pluies s'étalant de mai-juillet à octobre-novembre. Le total pluviométrique varie entre 800 et 1.800 mm. Cependant, c'est entre les isohyètes 1.200 et 1.600 mm que les sols rouges sont particulièrement abondants et dominants. Par contre, ils sont très peu représentés, et apparaissent en déséquilibre, sous des pluviométries annuelles de 800 à 1.100 mm. Pour les pluviométries supérieures à 1.600 mm, les sols rouges sont localisés en taches et sont de moins en moins dominants en superficie relative.

Les températures annuelles dans les diverses régions sont assez voisines. Mais les températures du sol ne sont pas connues. A Séfa, des mesures ont pourtant été effectuées. Elles ont indiqué des augmentations importantes de température dans les profils qui avaient perdu leur couverture forestière. Cependant ces variations s'amortissaient rapidement en profondeur. Dans ces conditions, il est évident que les relevés annuels, ou même mensuels, de la température de l'air, n'ont que peu d'intérêt pour caractériser le facteur climat dans la pédogénèse. Les autres variables, l'hygrométrie et l'évaporation étant très dépendantes de la pluviométrie, nous avons jugé possible de caractériser la variable climatique concernant les sols rouges du Sénégal par les critères suivants :

- climat tropical à longue saison sèche
- une seule saison des pluies
- pluviométrie variant de 800 à 1.800 mm, avec un maximum en août de presque 30 % du total.

Dans ces conditions les sols rouges sont particulièrement abondants entre les isohyètes 1.200 et 1.600 mm. Il s'agit surtout de la Casamance, dont le climat particulier a été dénommé par AUBREVILLE (1949) "sous climat maritime du climat sahélo-soudanais", ou "climat guinéen de Basse-Casamance".

1.2 - Au Dahomey et au Togo

Bien que les sols rouges soient situés tout le long de la côte, sur une distance à peine supérieure à 200 km, il y a des variations importantes de pluviométrie annuelle. A l'est de Porto-Novo (au Dahomey), le total des pluies atteint presque 1.500 mm et il semble dépasser nettement cette limite au Nigéria. A Lomé, au Togo, limite ouest des sols rouges, la pluviométrie annuelle moyenne est de 800 mm.

Mais dans tous les cas, il s'agit d'un climat à deux saisons des pluies, la première d'avril à juin, la seconde de septembre à octobre, avec une petite saison sèche en août. C'est un climat équatorial de transition dans lequel les pluies sont mieux réparties qu'au Sénégal. En moyenne, le mois à maximum de précipitations ne représente que 200 mm à Lomé et moins de 350 mm à Porto-Novo. L'intensité des pluies est également moins élevée que dans les régions soudaniennes. Dans ce milieu, les sols rouges les plus profonds, et les plus caractéristiques, se situent entre les isohyètes 1.000 et 1.400 mm.

1.3 - En Haute-Volta

Le régime climatique de la région où sont inventoriés les sols rouges peut être schématisé par celui des deux stations de Bobo-Dioulasso et Banfora :

- Bobo-Dioulasso : 1.150 mm de pluviométrie annuelle moyen.
- Banfora : 1.188 mm, avec maximum, en août, de l'ordre de 320 mm à 350 mm (moyenne calculée sur 31 années).

Dans les deux cas, il s'agit d'un climat soudano-guinéen à limites bien marquées, à deux saisons bien contrastées, comme au Sénégal. Malheureusement, les renseignements sur l'intensité des pluies sont insuffisants pour être utilisables en vue d'une meilleure comparaison entre les trois pays.

Le total pluviométrique correspondant à la limite nord de présence des sols rouges sur le terrain a été évalué entre 800 et 900 mm. Dans ces régions, les sols rouges sont de plus en plus limités en superficie relative.

1.4 - Conclusions

La présentation succincte des conditions climatiques existant dans les trois grandes régions de l'Afrique Occidentale, permet d'avancer les conclusions suivantes :

- les limites pluviométriques extrêmes d'existence actuelle de sols rouges sont : 800 mm et 1.800 mm, peut-être 2.000 mm (moyennes annuelles) ;
- les sols les plus profonds et les plus représentés en superficie correspondent aux pluviométries de 1.200 à 1.600 mm au Sénégal, de 1.100 à 1.250 mm en Haute-Volta, de 1.000 à 1.400 mm au Dahomey. Mais nous rappelons qu'il n'y a pas de roches gréseuses sous une pluviométrie annuelle supérieure à 1.250 mm en Haute-Volta.

Cette relative concordance des chiffres ne doit cependant pas faire perdre de vue que le régime climatique n'est pas identique : dans un cas, deux saisons des pluies (Dahomey), dans les deux autres une seule saison.

Dans les régions granito-gneissiques d'Afrique Occidentale, la limite nord des sols ferrallitiques correspond à peu près à des pluviométries minima de 1.200 ou 1.300 mm/an. Dans ces conditions, l'existence de sols rouges très profonds, et très comparables dans des régions très éloignées, avec un maximum d'extension entre 1.200 et 1.400 mm, a été considérée comme marginale. Les sols rouges seraient inactuels, résiduels de périodes anciennes de ferrallitisation, correspondant à d'anciens climats nettement plus humides. Cette interprétation mérite un examen approfondi.

2) Rôle du climat dans la pédogénèse

2.1 - Réalité des variations climatiques

Il est possible d'affirmer que des climats anciens, plus humides que les climats actuels, ont existé en Afrique Occidentale dans les régions retenues dans cette étude. Les arguments d'ordre préhistorique, paléobotanique, géomorphologique ou sédimentologique sont nombreux dans la bibliographie. Les plus nets se rapportent aux travaux suivants, exposés très succinctement :

- sur la réalité des oscillations climatiques dans les régions tropicales : HUBERT (1920), TRICART, MICHEL et VOGT (1957), BUTZER (1961), AUBREVILLE (1962) TRICART (1963). Les auteurs les plus récents insistent sur l'importance des oscillations climatiques au Quaternaire, soit après le dépôt des continentaux terminaux.
- sur les corrélations entre des pluviaux et des transgressions : ELOUARD (1966) qui analyse ce problème pour le cas du Sénégal, et MICHEL, ELOUARD et FAURE (1967) qui datent la transgression nouakchottienne, donc un pluvial, vers 5.500 BP.
- sur l'existence au Quaternaire de climats nettement plus humides que l'actuel, marqués souvent par de grands lacs : PIAS (1958 et 1967) définit les transgressions du lac Tchad et attire l'attention sur leur nombre, DELIBRIAS, HUGO et QUEZEL (1957) déterminent la présence de foyers néolithiques au Sahara entre 5.000 et 5.500 BP. FAURE (1966) indique le maximum d'extension des lacs holocènes au Sahara à - 22.000 BP. SERVANT T. et Mme SERVANT (1970) précisent que les périodes lacustres importantes du Tchad peuvent être datées de 40.000 à 22.000 BP, et de 12.000 à 11.000 BP. La dernière transgression correspondant à un changement climatique majeur serait de 10.000 à 9.000 BP. Par des voies différentes LHOTE (1960) repère la présence de pasteurs au Sahara vers 5.500 BP. Plus récemment MICHEL (1964, 1967 et 1970) a proposé une chronologie climatique au Quaternaire des bassins du Sénégal et de la Gambie. De ce travail, nous retenons surtout qu'une période très humide aurait correspondu à la transgression de l'Inchirien (interglaciaire Riss-Wurm) datée entre 31.000 et 40.000 BP. Elle se serait traduite par un cuirassement important, la rubéfaction étant estimée par MICHEL comme corrélative du début de la période humide. Mais auparavant, deux autres périodes humides sont définies, l'une vers 200 à 300.000 ans, l'autre au Tafarien vers 700 ou 800.000 ans.

En définitive on peut admettre comme suffisamment probable les faits suivants :

- au Quaternaire ancien et moyen, deux longues périodes humides ont été séparées, et encadrées, par trois grandes périodes sèches.
- au Quaternaire récent, les variations apparaissent plus faibles, de plus courte durée, mais importantes quand aux conséquences morphogénétiques. Les dernières périodes humides notables y dateraient de 10.000 à 6.000 BP.

2.2 - Conséquences des variations climatiques quaternaires

La réalité de variations climatiques importantes au Quaternaire est donc suffisamment prouvée. Il n'est cependant pas possible de préciser l'augmentation de pluviométrie que les diverses phases humides ont pu présenter. Mais il est logique de penser que ces phases ont dû influencer sur la genèse des sols rouges. C'est pourquoi, certains auteurs (MAGNIEN, 1960 b, PIAS, 1966) ont insisté sur l'importance des influences anciennes sur la morphologie, l'évolution et la répartition des sols en Afrique Occidentale.

Par contre, l'existence de climats anciens, nettement plus secs que l'actuel, est moins prouvée, mais elle est plausible. De telles variations climatiques ont pu se traduire par une érosion intense, et des superficies de sols rouges ont pu disparaître, définitivement ou non, dans certaines régions. C'est dire que l'âge des sols est difficile à préciser. Il ne correspond pas forcément à l'âge de la fin de dépôt des matériaux originels, mais plutôt à celui du façonnement des surfaces géomorphologiques. Encore s'agit-il d'un maximum, la pédogénèse rubéfiante ayant pu tarder à s'affirmer sur ces surfaces. Il est donc possible que certains sols rouges aient commencé leur évolution seulement lors des dernières périodes humides importantes, soit 40.000 à 30.000 BP, soit 6 à 10.000 BP. Par contre, d'autres sols peuvent être résiduels et dater de périodes fin tertiaires ayant été incomplètement érodés lors des phases arides successives.

Il y a donc sûrement plusieurs générations de sols "rouges". Mais quelle que soit l'ancienneté du début de l'évolution pédologique, le problème est de savoir si ces sols poursuivent actuellement le même type d'évolution.

Plusieurs auteurs, dont MAIGNIEN (1959 a, 1960, a et b) considèrent que les sols "rouges" sont inactuels, préservés sur les points les plus hauts des modelés. Par un véritable phénomène d'hysteresis leurs caractères spécifiques se conservent, dans la mesure où l'érosion n'a pas encore eu le temps de tout entraîner. Mais la répartition climatique des sols nous incite à nuancer cette conception.

2.3 - Actualité de l'évolution de certains sols rouges

Il est remarquable que l'extension maximum des sols rouges dans les trois régions est située au-dessus de la pluviométrie 1.200 mm. Au-dessus de 1.800 ou peut-être 2.000 mm, les sols rouges disparaissent progressivement. En-dessous de 1.000 mm, ils diminuent considérablement en surface, ne subsistant que sur les surfaces les plus anciennes.

Les types de climats qui ont permis la pédogénèse rubéfiante sur grès doivent encore exister quelque part actuellement. Leur pluviométrie est probablement inférieure à 2.000 mm, puisque les sols rouges disparaissent des modelés qui se trouvent actuellement sous cette pluviométrie. De plus, nous n'avons pas pu trouver d'indications permettant d'affirmer que des sols rouges jeunes sont en voie de différenciation sur les surfaces les plus récentes dans les régions très humides. D'autre part, en dessous de 1.000 mm de pluviométrie, les sols rouges sont en position de buttes témoins. Ce fait suggère deux explications possibles : l'équilibre pédogénèse-érosion est perturbé au profit de cette deuxième, ou bien la pédogénèse actuelle oriente les profils vers un autre type de morphologie.

C'est donc entre 1.200 et 1.600 mm ou peut-être 1.800 mm que les sols rouges se conservent le mieux. Si l'on admet que les climats qui président à leur formation n'ont pas disparu, c'est donc entre ces isohyètes que les sols ont le plus de chance, soit de se créer, soit de s'approfondir.

Nous proposons donc les conclusions provisoires suivantes :

- au dessous de 1.000 mm, les sols rouges seraient inactuels, résiduels de climats plus humides. Ils s'érodent, ou ils changent de morphologie, mais ils ne se forment pas actuellement ;

- au-dessus de 2.000 mm les sols rouges ne se forment pas, ou ont disparu s'ils ont existé ;
- entre 1.000 et 2.000 mm, certains sols rouges seraient inactuels, mais se conserveraient, d'autres continueraient à s'approfondir, d'autres enfin évolueraient vers un nouveau type de profil. Ces trois possibilités seraient en relation avec l'action d'autres facteurs, en particulier la position des sols sur les modelés. C'est entre 1.200 et 1.800 mm que l'approfondissement a le plus de chance de se poursuivre, c'est-à-dire que beaucoup de sols rouges y seraient actuels et non relictés.

La limite inférieure de 1.200 mm est évidemment approximative. Il s'agit d'une pluviométrie moyenne annuelle. Or l'expérience montre qu'il y a des années exceptionnelles. A séfa, où la moyenne est de 1.300 mm, plusieurs années ont reçu plus de 1.800 mm de pluie. Dans ces conditions, il est possible que certains profils, situés dans la zone de 1.000 à 1.300 mm, n'évoluent que lors de pluviométries exceptionnelles. Cette évolution est prise surtout dans le sens d'une poursuite de leur approfondissement, la morphologie caractéristique des horizons supérieurs étant respectée.

Ces conclusions résultent d'un raisonnement établi à partir des observations d'ordre climatique. Mais deux arguments complémentaires sont à citer :

- les profils les plus profonds ont été inventoriés entre des isohyètes 1.300 et 1.800 mm ;
- c'est à partir de 1.200 mm que des horizons profonds humides toute l'année ont été observés le plus souvent. C'est le cas en Moyenne-Casamance, et en Haute-Volta près d'Orodara. Cette humidité des horizons profonds indique que le drainage est supérieur à l'évapotranspiration. C'est évidemment dans un tel cas que l'approfondissement est possible, ce qui renforce l'opinion d'une pédogénèse actuelle.

3) Conclusions sur le facteur climatique

C'est entre les isohyètes 1.200 et 1.600 mm que les sols rouges sont les mieux représentés sur le plan géographique. C'est aussi entre ces limites de pluviométrie qu'ils sont les plus profonds, et qu'un drainage vers

des nappes a pu être observé dans certains cas. Dans la mesure où l'on admet que des sols rouges se forment, ou s'approfondissent actuellement, il est donc probable que cela nécessite des pluviométries supérieures à 1.200 mm. Nous pensons donc qu'une certaine proportion de sols rouges sont inactuels, résiduels de climats anciens plus humides dont l'existence est prouvée. Ils se conservent, ou s'érodent, ou se transforment selon les conditions du milieu. Mais nous admettons, comme hypothèse de travail, que certains profils peuvent continuer à évoluer, en s'approfondissant actuellement.

Le facteur climatique est donc essentiel. Mais si nous avons proposé des limites pluviométriques, par contre nous n'avons pas pu définir le mécanisme de son action. En particulier, le rôle du climat dans la rubéfaction reste hypothétique. Ce problème devra donc être abordé par une méthode différente.

B - LES ROCHES-MERES

Les roches-mères sur lesquelles les sols rouges se sont constitués ont été présentées soit comme des formations du Continental terminal, soit comme des grès cambriens. Ces dénominations ne suffisent pas pour les définir sur le plan pétrographique. Une recherche de meilleurs critères s'impose. Elle se fera par région géographique.

1) Au Sénégal

1.1 - Le Continental terminal

Tous les sols rouges inventoriés au Sénégal sont installés sur ce que les géologues appellent le Continental terminal. Ce terme de Continental a été créé par KILIAN (1931) pour nommer les niveaux continentaux du Sahara, et concerne des sédiments détritiques azoïques. Leurs faciès présentent une grande similitude quel que soit leur âge (FURON, 1960). La plupart des auteurs qui ont traité du Continental terminal (C.T.) du Sénégal l'ont considéré comme le résultat d'un épandage de nappe en milieu semi-aride, d'âges pliocène (TESSIER, 1952), miopliocène (MICHEL, 1960 b). Ces nappes proviendraient de l'érosion de sols latéritiques situés plus à l'est (MICHEL, 1960 a). Les épandages successifs sont constitués, schématiquement, de sables argileux à argilo-sableux, avec présence de niveaux gréseux, à ciment ferrugineux, et de lits argileux peu épais.

DIENG (1963), dans son étude sur le Continental terminal du Sénégal, précise qu'il s'agit de toutes les formations entre les dépôts marins datés de l'Eocène, et la latérite considérée comme quaternaire. Mais il conclut à la différence d'âge selon les régions, en raison de la régression marine progressive dans le bassin sédimentaire. Dans ces conditions, en Casamance, il s'agirait du Pliocène. Mais c'est une hypothèse, puisqu'aucun fossile n'a encore été trouvé dans ces formations détritiques. L'assise supérieure est formée de grès, le type affleurant étant argileux-blanc-rouille, avec en profondeur des grès rubanés et des grès argileux bariolés. L'assise inférieure qui n'affleure guère, connue surtout par les puits et sondages, est formée d'argiles schisteuses, associées soit à des limons ferrugineux lie-de-vin, soit à des sables ferrugineux rougeâtres. Elle repose, en Casamance, sur l'Eocène.

Les grès qui constituent la série sub-affleurante sont des grès détritiques. Ce sont ceux qui ont subi l'action de la pédogénèse. La série de Goudiry (150 m de puissance) comprend des grès argileux blancs à larges taches d'oxydes de fer brun-rougeâtre. C'est une roche tendre à grains hétérogènes ou hétérométriques. Si le façonnement par l'eau semble certain, l'association des minéraux lourds (biotite, tourmaline, andalousite, et zircon) permet de donner pour origine à ces grès les granites et pegmatites du socle birrimien. Dans les niveaux gréseux sont interstratifiés des sables généralement grossiers, et quelques bancs argileux blancs jaunes, parfois violacés, dont le minéral argileux est essentiellement de la kaolinite avec quelques traces d'illite. DARS (1961) a observé la disparition des minéraux altérables dans les niveaux à l'affleurement. Dans les niveaux gréseux, DIENG cite la généralisation de la présence de grains de quartz corrodés, parfois accompagnés d'agrégats ferrugineux. Enfin, l'étude morphoscopique l'amène à considérer qu'il s'agit de débris d'altération du socle pris en charge sur une faible distance par les eaux courantes, et déposés dans une fosse à décantation.

Ce Continental terminal est recouvert souvent d'une épaisse cuirasse ferrugineuse, datée par MICHEL (1960 a) du Pliocène supérieur, et par ELOUARD (1962) du Villafranchien. Dans les régions septentrionales, des dunes éoliennes surmontent l'ensemble.

1.2 - Les roches-mères en Casamance

Dans cette région, où les sols rouges sont très abondants, la cuirasse ferrugineuse sommitale n'existe plus. Seuls des affleurements localisés sur les pentes sont observables sur le terrain. L'examen de divers puits, creusés sous la couverture de sols rouges, permet de définir les niveaux sédimentaires par les caractères suivants :

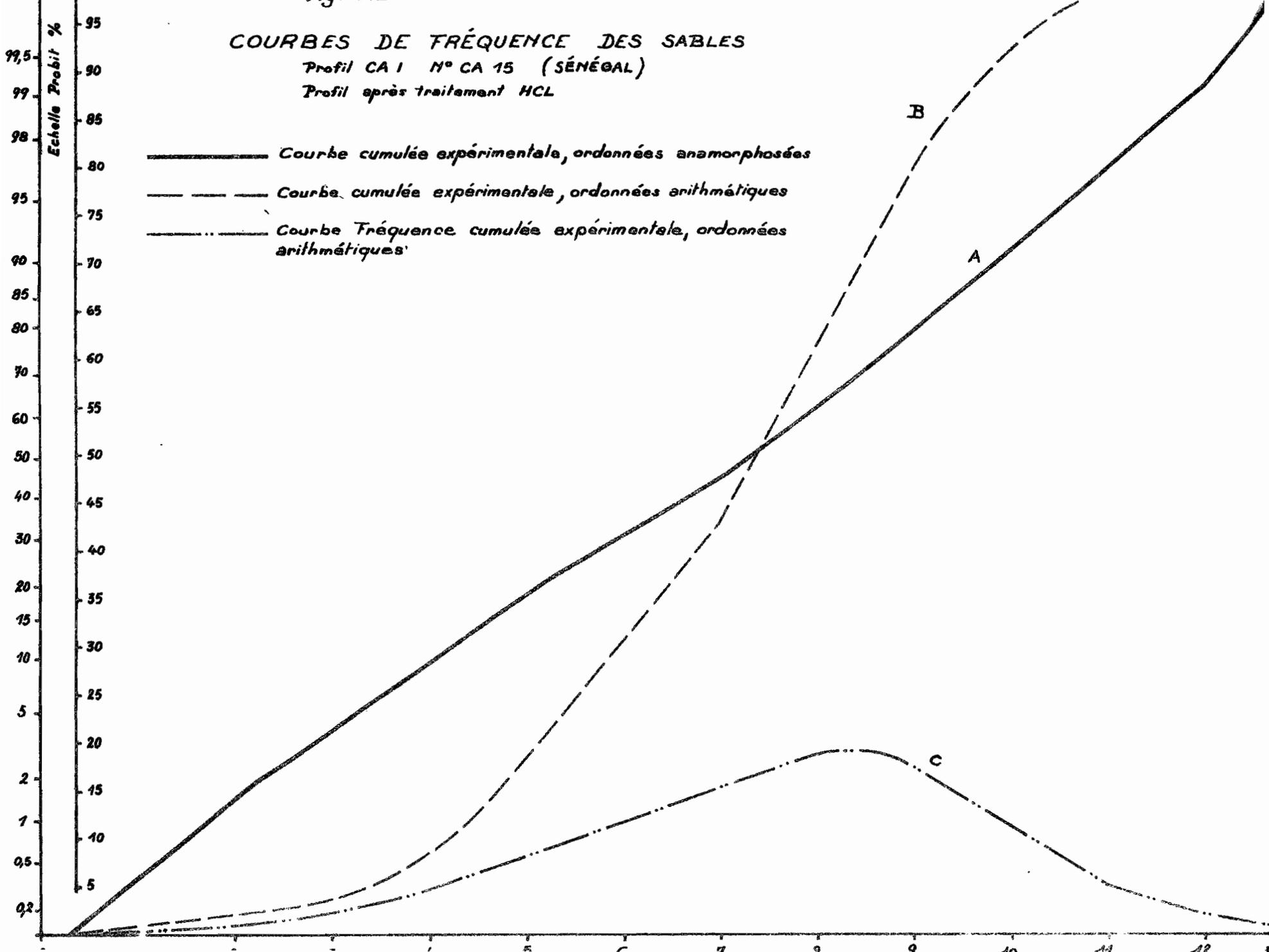
- l'épaisseur des différentes couches est faible, les niveaux sableux ou argilo-sableux ou grèsifiés, colorés ou non, se succédant presque tous les mètres sur le plan vertical.
- les niveaux contiennent souvent des concrétions et des taches ferrugineuses. Les pédologues les interprètent, d'après leur morphologie, comme caractéristiques d'une action de nappe phréatique. Cette dernière se trouve actuellement entre 10 et 25 mètres de profondeur en Moyenne et Basse-Casamance.
- les teneurs en argile granulométrique sont variables mais le plus souvent inférieures à 35 %. Le minéral argileux est essentiellement la kaolinite, avec présence irrégulière d'illite.
- les matériaux sont constitués de quartz de tailles variées, mais contenant toujours une proportion importante de sables grossiers. La figure A 2 présente un exemple de courbe de fréquence en ordonnées arithmétique et probit. L'examen de ces sables (LAUNAY et WACKERMANN, 1964) indique la superposition de couches alluvionnaires ayant parfois subi des actions éoliennes modérées. Le transport semble caractérisé par un vecteur relativement long : quartz non usés rarissimes, absence de feldspaths. Des figures de corrosion sont courantes. Elles sont toujours en relation avec des phénomènes de ferrugineisation, et elles semblent postérieures au dépôt des sédiments. Enfin, les minéraux suivants ont été repérés : disthène, staurotide, épidote, zircon, tourmaline, rutile, anatase, le pourcentage pondéral de l'ensemble étant de 0,22 % (FAUCK et DELAUNE, 1971). Ce sont des minéraux très résistants à l'altération, du cortège des granites. Le Continental proviendrait donc du démantèlement de sols, ou d'altérations, du socle granito-gneissique.

Fig. AZ

COURBES DE FRÉQUENCE DES SABLES

Profil CA 1 N° CA 15 (SÉNÉGAL)

Profil après traitement HCL



1.3 - Conclusions

Les sols rouges reposent sur des matériaux originels dont la variabilité des caractères est élevée. L'homogénéité apparente des sols rouges sur une grande épaisseur est donc à opposer à l'hétérogénéité probable que leurs roches-mères véritables présentaient. Les matériaux du sidérolithique sont très altérés, pratiquement dépourvus de minéraux altérables. La mise en place de ces matériaux est probablement due à l'érosion de sols ferrallitiques sur le socle granito-gneissique. Mais rien n'indique qu'à leur dépôt ces sédiments étaient au même stade d'altération qu'actuellement. La conclusion que l'on peut tirer sur le type de sols d'origine n'est donc qu'une possibilité.

2) Au Dahomey et au Togo

2.1 - Le Continental terminal

Dans ces deux pays, les Terres de barre, sols rouges, occupent l'ensemble des plateaux qui correspondent exactement au Continental terminal. GUILCHER (1959) a été l'un des premiers à essayer de préciser ce matériau par étude granulométrique. Il a conclu à une mise en place sous conditions subaériennes tropicales, avec consolidations sporadiques, et il a insisté sur la probabilité d'actions chimiques plus nettes dans les échantillons de surface qu'en profondeur. Auparavant, de CHETELAT (1926) et ARCHAMBAULT (1950), cités par SLANSKY (1959), avaient parlé de formation éolienne.

SLANSKY (1959) a ensuite défini les limites du Continental terminal entre l'Eocène marin et les dépôts récents alluvionnaires ou littoraux. Le recouvrement continu de terre de barre est qualifié de mélange meuble de sable et d'argile de couleur brun-rouge, les proportions de sables et d'argiles ferruginisées étant très variables, de même que la granulométrie des sables. Dans les régions les plus septentrionales, il apparaît des niveaux de grès dur sur les pentes. Tenant compte de leur présence nettement moins développée au centre des plateaux, SLANSKY émet l'hypothèse que ce faciès gréseux est dû à une induration de la terre de barre près de la surface par un phénomène de cuirassement d'ordre pédologique.

D'une façon générale, le terme supérieur du Continental terminal sur lequel se sont développées les terres de barre, comporte des faciès sableux, sablo-argileux, gréseux et argileux, généralement assez grossiers. Les teintes sont variées, du blanc au rouge-clair. Certains échantillons ont fait l'objet d'une étude pétrographique. Plusieurs fois SLANSKY précise que les analyses granulométriques des sables argileux ont été parfois perturbées par de nombreuses particules d'argile et de grains de quartz agglomérés qui n'ont pu être éliminés, et qui déforment les courbes à leur extrémité. Dans tous les cas, la phase argileuse est kaolinique, que les couleurs soient blanches, jaunes, violettes, rouges ou lie-de-vin. Les teneurs en argile sont assez variables. Au Nigéria, VINE (1959) a également noté les variations des taux d'argile. Il a émis l'hypothèse que les lits d'argile en place lors du dépôt du Continental terminal, ont pu être redistribués par la suite dans les sables, du fait de l'altération, peut-être de la pédogénèse.

Au Togo, MILLETTE et VIEILLEFON (1967) ont observé, en profondeur d'un puits, des chandelles d'argile jaune de quelques mètres qui découpent l'argile rouge, avant de passer à une phase argileuse, jaune, puis à des sables blancs, jaunes, roses. A grande profondeur des couches superposées d'argile rouge ont été signalées (à Maouni). Certains niveaux ont donc une rubéfaction héritée.

2.2 - Les roches-mères

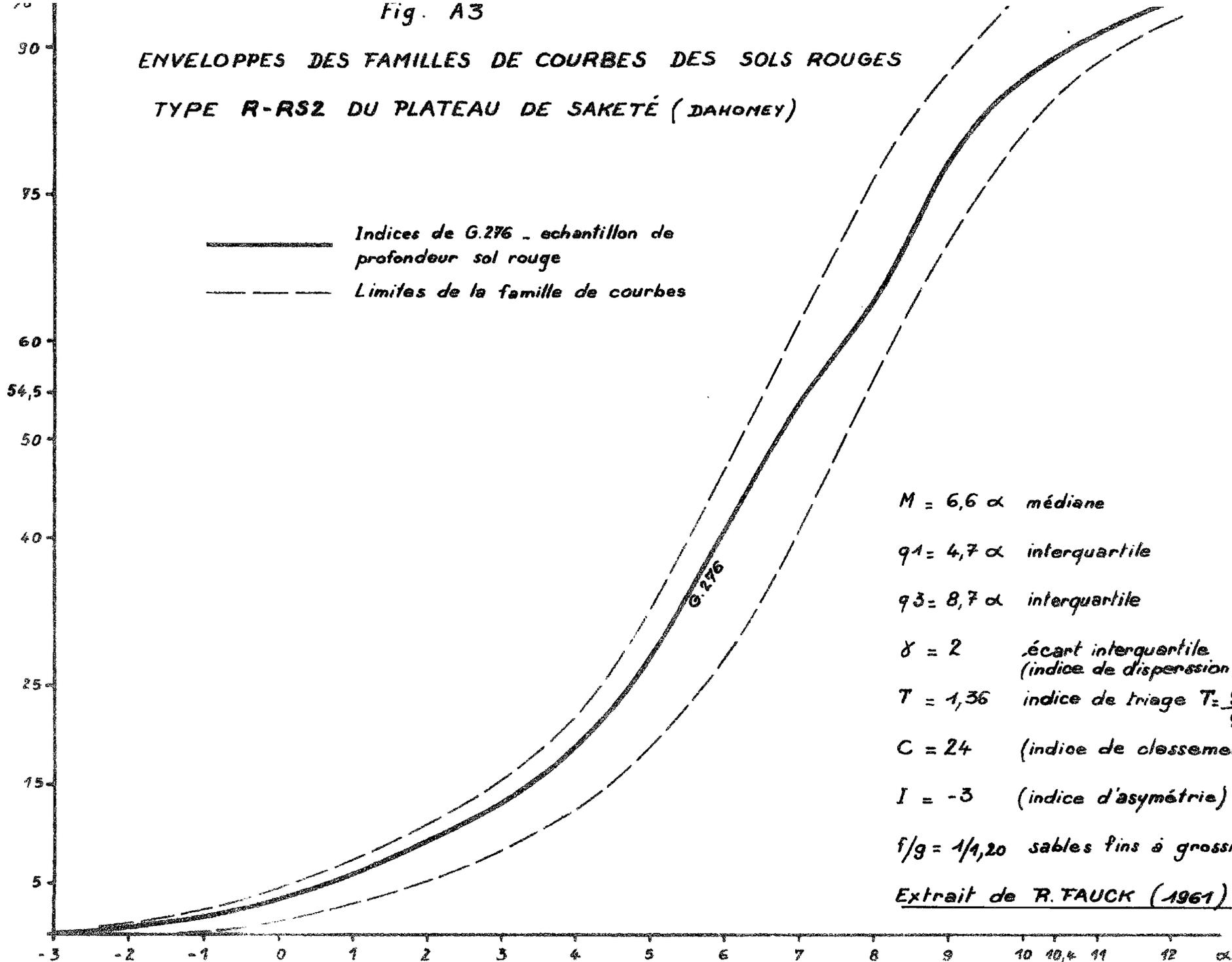
Les pédologues qui ont étudié la terre de barre ont réalisé de nombreuses études granulométriques et morphoscopiques. Mais vue l'épaisseur des sols, peu d'échantillons sont extérieurs aux niveaux rubéfiés superficiels, parfois épais de 10 mètres. La caractérisation des roches-mères sera donc déduite de l'étude des horizons C.

Nous avons dressé plusieurs centaines de courbes granulométriques des sables dans les horizons B et C. Il n'est pas possible de les présenter dans le texte. Une série de 126 prélèvements concerne la région est du Dahomey (Agonvy), leur dépouillement a permis le regroupement des sols en plusieurs familles granulométriques. Le tableau n° A 3 en fournit un exemple. Les sédiments ont une allure bien triée, avec un indice de classement élevé. L'indice d'asymétrie indique que le triage est plus poussé dans les granulométries gros-

Fig. A3

ENVELOPPES DES FAMILLES DE COURBES DES SOLS ROUGES
 TYPE R-RS2 DU PLATEAU DE SAKETÉ (DAHONEY)

— Indices de G.276 - échantillon de profondeur sol rouge
 - - - Limites de la famille de courbes



$M = 6,6 \alpha$ médiane

$q_1 = 4,7 \alpha$ interquartile

$q_3 = 8,7 \alpha$ interquartile

$\delta = 2$ écart interquartile
 (indice de dispersion)

$T = 1,36$ indice de triage $T = \frac{q_3}{q_1}$

$C = 24$ (indice de classement)

$I = -3$ (indice d'asymétrie)

$f/g = 1/1,20$ sables fins à grossiers

Extrait de R. FAUCK (1961)

sières. L'établissement des tableaux à double entrée, M (médianes) δ (indice de dispersion), confirme qu'il ne peut être précisé une gamme quelconque de granulométries des sables favorisant le développement des sols rouges. Cependant, les quelques cas de profils de couleur beige inclus dans le paysage à sols rouges, ont toujours été reliés à des matériaux riches en sables très fins.

Si les rapports entre classes de sables sont variables, cependant, il y a généralement une augmentation de la quantité relative de sables fins en progressant des horizons C vers les horizons B. Ce fait est à retenir, mais il n'est pas possible, pour l'instant, de lui attribuer une origine d'ordre sédimentaire ou d'ordre pédologique. Une étude morphoscopique complémentaire a été effectuée, après attaque à l'HCl. Elle indique que la proportion de grains corrodés chimiquement croît nettement vers le haut des profils.

Enfin, les études granulométriques ont confirmé l'augmentation systématique des teneurs en argile en passant des couches sédimentaires aux sols. Cette augmentation pourrait être héritée de la sédimentation elle-même, car le matériau originel transformé en sol n'est plus reconnaissable. Mais il semble qu'il y aurait contradiction avec la notion de séquence lithologique négative (MILLOT, 1964). Cette notion, applicable à l'étude géologique du bassin, suppose le dépôt en premier des éléments les plus fins. Même s'il est probable que les alternances de sédimentation ont dû être nombreuses, une origine d'ordre pédologique est donc à envisager.

2.3 - Conclusions

Les roches-mères des sols rouges du sud du Dahomey et du Togo sont très comparables à celles du Sénégal. La variété des caractéristiques granulométriques est grande, mais les caractères communs sont encore la présence du quartz, et la prédominance de la kaolinite. Ce type d'argile est caractéristique de tous les sidérolithiques, même dans les régions tempérées (KULBICKI, 1957). Il n'y a donc pas, ou il y a très peu, d'altérations de minéraux primaires par pédogénèse. Cette dernière ne peut donc pas être qualifiée de ferrallitique, puisque les matériaux originels ont déjà cette caractéristique.

3) En Haute-Volta

3.1 - Les grès primaires

Sur les cartes pédologiques au 1/500.000 de la Haute-Volta (MOREAU et LEPRUN, 1969), les sols rouges ferrallitiques sont représentés soit en unités cartographiques dites pures (sol représenté seul du fait de sa dominance relative en superficie), soit en association avec d'autres sols. En comparant la représentation de l'ensemble de ces unités à une carte géologique, on s'aperçoit qu'elles se superposent à la zone des grès à "yeux de quartz" du Cambrien, (JONQUET, 1963). Dans la région sud, de Bobo-Dioulasso à Orodara, la correspondance est très bonne. Les seules différences constatées se relient à des matériaux remaniés, issus des grès précédents, et étalés localement sur l'étage voisin de la carte géologique. Par contre, vers le nord, les sols rouges, uniquement en unités associées, disparaissent pratiquement au niveau de Warkoye, alors que la carte géologique mentionne une bande de grès de plus en plus étroite jusque Dedougou.

Les sols rouges sont donc strictement installés sur l'étage géologique des grès à "yeux de quartz", mais dans une zone climatique comprise entre les isohyètes 1.000 et 1.250 mm. En dessous de l'isoyète 1.000 mm, ils n'existent pas, soit qu'ils n'ont pu se développer, soit qu'ils ont disparu. Au-dessus de 1.250 mm, il n'y a pas de grès à yeux de quartz.

Ces faits sont remarquables, car toute la région ouest de la Haute-Volta est couverte de grès primaires, en superpositions régulières depuis la falaise de Bobo-Dioulasso jusque l'autre côté de la frontière du Mali. Ces grès primaires ont été subdivisés en plusieurs groupes au fur et à mesure de l'étude des puits de la région, SAGATZKY (1954), PALAUSI (1959), LAJOINIE (1960), JONQUET (1963). Mais si les interprétations stratigraphiques ont pu se modifier légèrement, les définitions pétrographiques situent les grès de l'étage à yeux de quartz parmi les plus grossiers. Les autres types sont surtout classés dans les grès fins et les grès schisteux. Il est cependant assez difficile de pousser plus loin la comparaison vue la variabilité des faciès dans un même étage stratigraphique.

3.2 - Les grès à "yeux de quartz"

Ces grès de l'étage à "yeux de quartz", définis par JONQUET (1963), présentent une stratification entrecroisée. Ils sont grossiers, friables, avec des galets centimétriques de quartz. Les ciments sont variables, souvent d'argile kaolinitique, ou ferrugineux, mais parfois, ils manquent. Les couleurs varient du blanc au rose, et des passées de schistes argileux rouges sont parfois signalées.

Les études détaillées de certains puits ont fourni l'ensemble suivant d'observations (FAUCK et DELAUNE, 1971) :

- les formations gréseuses sont hétérogènes, puisque sous le seul profil HFA les grès varient en quelques mètres du grès fin au grès moyen ;
- les niveaux supérieurs rubéfiés ont une richesse élevée en argile dont l'origine ne peut être que le résultat d'une altération, car il n'y a pas de modification relative de la granulométrie des sables, mais simplement abaissement de leur médiane ;
- l'absence de quartz ovoïdes, l'usure faible, posent le problème de l'origine marine de ces grès, bien que les géologues aient pensé à des conditions littorales avec mise en place de bancs de galets marins. DAVEAU (1960) envisageait d'ailleurs une formation littorale de pied de falaise, tantôt à peine remaniée, tantôt interstratifiée de bancs de galets marins. Il s'agit donc peut-être, dans certains cas, de formations fluviolacustres comparables aux continentaux du Sénégal et du Dahomey. ;
- il y a trois types de quartz, luisants, mats et mixtes. Mais la corrosion des grains est parfois si poussée que quelques grains (vers 0,8 mm) sont réduits à l'état de squelettes. L'altération a enlevé souvent l'aspect luisant, ce qui rend difficile la séparation avec les résultats d'une action éolienne ;
- on retrouve la même association de minéraux lourds dans tous les horizons (tourmaline, zircon, rutile, anatase). C'est celle des minéraux du granite, avec des épidotes, minéraux du matamorphisme.
- quelques rares feldspaths de grande taille (3 à 5 mm) ont été parfois signalés (HFA 19, sous l'horizon C du sol). Leur présence indique que le matériau

en contenait donc, Un tel matériau pourrait provenir de l'érosion soit de roches en voie d'altération après décapage de tous les sols, soit de sols non ferrallitiques, Ces feldspaths ne sont jamais signalées dans la partie transformée en sol ;

- enfin des niveaux gréseux cohérents existent parfois à faible profondeur, Il y a deux cas séparables :

- a) celui de l'horizon C constitué de grès compacts mais altérés, bariolés de rouge, ocre, jaune et pouvant se prolonger sur de nombreux mètres.
- b) celui de niveaux peu épais, désagrégés, intégrés dans des profils de sols rouges. Ils ont été imparfaitement digérés par la genèse d'un sol, la rubéfaction, cependant, s'étant installée sur l'ensemble.

3.3 - Conclusions

Les sols rouges de Haute-Volta n'existent que sur un type bien particulier de grès et sous des pluviométries supérieures à 1.000 mm. Ces grès, appelés à "yeux de quartz", sont grossiers comparativement aux autres étages gréseux du pays. Ils ne contiennent que très peu de minéraux altérables. Leur hétérogénéité est assez grande, mais elle disparaît apparemment dans les sols. Ceux-ci ne sont donc pas lithochromes, c'est-à-dire développés sur des roches-mères rouges.

4) Conclusions sur les roches-mères

Les roches-mères des trois régions étudiées pour leurs sols rouges appartiennent à des étages géologiques très différents. Mais elles ont pourtant des caractères communs nombreux. En effet, malgré l'hétérogénéité des couches sédimentaires, il s'agit toujours de sables quartzeux, plus ou moins argileux, et plus ou moins grèsifiés par des ciments ferrugineux. Enfin, ces matériaux sont très altérés, puisque pratiquement la kaolinisation est complète.

Quels sont donc, parmi les caractères particuliers que présentent ces "matériaux" par rapport à d'autres roches, ceux qui peuvent avoir, ou avoir eu, une influence prépondérante sur la genèse des sols rouges ?

Il nous paraît possible d'en envisager deux :

- a) - cohésion faible des roches, puisque lorsqu'il s'agit des grès leur état d'altération est toujours important. Cette cohésion faible est en liaison avec une porosité élevée qui facilite l'infiltration des eaux de pluie. Il est remarquable, en effet, que les régions à sols rouges sont très perméables. Les réseaux hydrographiques sont alimentés souvent par des sources comme c'est le cas en Casamance, et dans le sud-Dahomey. GOUZES (1961) signale que la nappe du Continental terminal se déverse lentement, toute l'année, dans les exutoires. CADILLAC (1965) précise également l'importance de ces débits de nappe dans l'alimentation en eau des rizières de Casamance. En Haute-Volta, la région située entre Bobo-Dioulasso et Orodara, est le chateau d'eau d'où partent des cours d'eau dans toutes les directions (bassin versant de la Volta).
- b) - état d'altération des roches-mères. Les roches-mères représentent une véritable ferrallite, au sens que l'altération ferrallitique des minéraux primaire est presque complète. Les possibilités de pédogénèse sur de tels matériaux originels sont donc forcément limitées dans le domaine chimique. Outre l'altération de la kaolinite, pratiquement seuls des phénomènes de dissolution, de déplacement et de réorganisation peuvent être envisagés. Dans ces conditions, les roches-mères des sols rouges représentent un facteur important qui oriente la pédogénèse dans des voies assez précises. Mais l'une d'elles, seulement, conduit à l'individualisation de sols rouges. Le facteur roche-mère est essentiel, mais il n'est donc pas suffisant pour expliquer leur genèse.

C - DONNES GEOMORPHOLOGIQUES

Le facteur "géomorphologie" dans la différenciation des sols présente deux aspects :

- la forme du modelé
- la position du profil sur le modelé

Les données recueillies sur ces questions seront présentées région par région.

1) Au Sénégal

1.1 - Le modelé de la Casamance

Plusieurs auteurs ont exposé les caractères géomorphologiques des régions tropicales, en particulier TRICART et CAILLEUX (1965). Dans le cas particulier de la Casamance, il s'agit des géographes SECK (1956) et MICHEL (1959, 1960 et 1970). Le fait essentiel est l'existence de plateaux mollement ondulés, dont l'altitude croît d'ouest en est, tout en restant inférieure à 70 mètres. Sur ces plateaux, les pentes sont rarement supérieures à 2 %. Ce n'est que sur les raccordements aux fleuves (Gambie, Casamance) que l'on peut déterminer l'équivalent de glacis, avec des pentes plus fortes mais cependant inférieures à 8 ou 10 %. Sur ces pentes, il y a des affleurements localisés de cuirasses. Dans les régions centre et ouest de la Casamance, où les sols rouges sont nombreux, ces plateaux sont entaillés par des dépressions hiérarchisées, à écoulement plus ou moins semi-permanent. Elles ont une forme de couloir large et un fond très plat, et de ce fait, sont considérées comme de caractères fossiles. Sur ce modelé, les sols rouges se situent sur les points les plus élevés, soit sur les lignes de crêtes larges, soit sur des plateaux étroits. Vers l'Est, ces plateaux deviennent plus étendus, et sont limités par un réseau hydrographique à mailles de plus en plus élargies. Il y a alors de moins en moins de sols rouges au profit des sols ferrugineux tropicaux de divers types. La prépondérance des sols rouges en surface relative, correspond donc, en même temps, aux pluviométries les plus élevées actuellement, et aux modelés caractérisés par les interfluves les moins larges. Dans les régions où ils sont moins bien représentés, les sols rouges se limitent aux surfaces les plus anciennes. Ce sont également celles au meilleur drainage extérieur.

1.2 - Le modelé des régions au nord de la Gambie

Dans la région de Nioro-du-Rip, les sols rouges sont isolés sur de petites buttes. Ils sont entourés soit d'affleurements de cuirasses, soit de sols ferrugineux portant des traces de remaniements de plus en plus nombreuses en allant vers les régions plus sèches.

Dans la région du Sénégal-Oriental, et également en Haute-Casamance, certains sols rouges sont associés à des surfaces récentes. A Goudiry (LEPRUN, 1967), un profil présente deux niveaux rubéfiés séparés par un lit gravillonnaire épais. Mais le paysage est dominé par des affleurements de cuirasse gréseuse, fortement érodés. Il est probable qu'il s'agit de sols lithochromes, développés sur des colluvions issus de sols rouges.

Nioro-du-Rip, Goudiry, et l'est de la Casamance sont situés sous des pluviométries inférieures à 1 mètre. En allant vers l'isohyète de 800 mm, les profils de sols rouges sont de moins en moins nombreux ; leur profondeur diminue, et les phénomènes d'érosion, de remaniement et de colluvionnement deviennent prédominants. L'équilibre morphogénèse-pédogénèse se déplace au dépend de cette dernière. Cela est en accord avec l'hypothèse avancée précédemment que les sols sont fossiles, et que l'érosion est le facteur essentiel d'évolution.

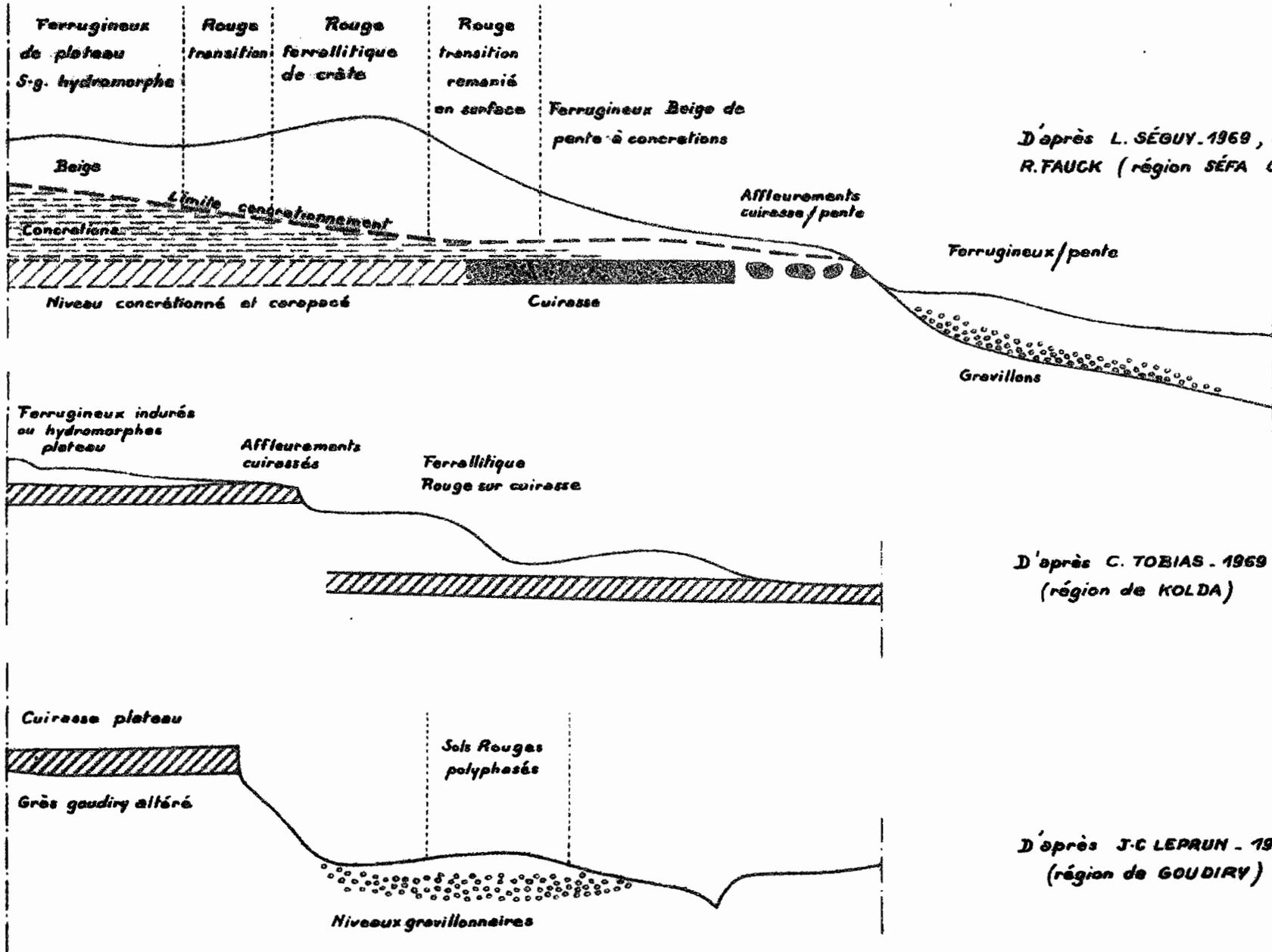
1.3 - Répartition schématique des sols sur le modelé

La figure A 4 présente des schémas théoriques de répartition des sols rouges sur les modelés. Le premier est un schéma modifié et complété de celui fourni par SEGUY (1969). La comparaison avec ceux établis par LEPRUN (1967) et TOBIAS (1965) met en évidence la relation qui existe entre le climat et la position des sols sur le modelé. Elle met en évidence également le rôle de la qualité du drainage externe. Ce dernier, cependant, dépend de la profondeur des nappes phréatiques. En Basse et en Moyenne-Casamance, cette profondeur varie de 10 à 25 mètres selon les régions. Dans les secteurs à sols rouges, la nappe est cependant toujours nettement en dessous de la limite inférieure des horizons B. Mais dans les horizons C, les caractères hydromorphes sont très nombreux. Il est probable que ces caractères sont hérités, car le drainage interne actuel est bon. Les nappes phréatiques ont dû évoluer au cours du Quaternaire, en relation avec les variations climatiques, et à certaines époques elles ont donc pu mordre sur les horizons B rubéfiés. C'est dire qu'aux périodes de forte humidité deux phénomènes ont pu se produire :

- d'une part, approfondissement du sol par augmentation de la percolation et diminution des effets érosifs du fait d'une couverture végétale plus dense ;

Fig. A4

LES TOPOSÉQUENCES SCHEMATIQUES A SOLS "ROUGES" DU SÉNÉGAL



D'après L. SÉGUY - 1969, modifié
R. FAUCK (région SÉFA CASAMANCE)

D'après C. TOBIAS - 1969
(région de KOLDA)

D'après J-C LEPRUN - 1967
(région de GOUDIRY)

- d'autre part, dans certaines conditions topographiques, diminution de la profondeur rubéfiée par remontée des niveaux engorgés. Ces derniers ont alors pu provoquer des phénomènes de concrétionnement et de cuirassement.

C'est dans cette optique que nous avons expliqué l'origine des affleurements de cuirasse de la région de Séfa. MICHEL (1965) a admis cette conception et a relié ces évolutions de nappe à des phénomènes de mouvement relatif du niveau des mers.

1.4 - Conclusions

La géomorphologie est un facteur très important dans la différenciation des sols rouges du Sénégal. Mais il y a une interaction entre la position des sols sur le modelé et les données climatiques. Les sols se trouvent sur les modelés les plus anciens, dans les régions les plus sèches, c'est-à-dire qu'ils ne se sont pas différenciés sur les surfaces récentes. On retrouve les conclusions proposées lors de l'étude climatique. Dans ces conditions, le facteur commun reliant les données du climat et celles concernant le modelé, est essentiellement le bilan hydrique des sols; c'est l'équilibre drainage-évapotranspiration qui détermine la conservation ou la poursuite de l'approfondissement des sols rouges. Ce n'est qu'à partir d'une pluviométrie de 1.200 mm que le drainage devient prodominant. Mais à partir d'une pluviométrie de 1.800 mm il semble qu'il devienne excessif, du moins dans certaines conditions topographiques.

2) Au Dahomey

2.1 - Les modelés

Définissant la région des terres de barre, GUILCHER (1959) insiste sur la notion de plateaux, dont les cotes ne varient qu'entre 20 et 75 m. dans le Sud-Est. Il caractérise le modelé de ces plateaux par le type d'entaille en vallées peu nombreuses et modérément encaissées. Ces vallées sont peu fonctionnelles, et leur envergure laisse à penser qu'elles ont dû permettre des ruissellements importants dans le passé. Ce serait la preuve de l'existence de paléoclimats plus humides. PELISSIER (1963) remarque que les thalwegs, peu nombreux, ont découpé des versants dont la convexité régulière n'est accidentée par le rebord d'aucun affleurement important. En fait, des affleurements de cuirasse existent, mais ils sont rares et surtout localisés dans le secteur nord

des terres de barre. Ils sont alors en rapport avec une certaine dissymétrie des versants (WILLAIME, 1961).

Les nappes phréatiques sont un peu plus profondes qu'en Casamance, les puits ayant généralement plus de 40 mètres de profondeur. Des observations faites sur les horizons C, en particulier vers Lomé et Porto-Novo, nous font admettre que des variations de niveau ont dû se réaliser au Quaternaire. En effet, les caractères hydromorphes observés apparaissent inactuels. Des phénomènes superficiels de remaniement ont également été observés en de nombreux endroits. VINE (1959) avait émis l'hypothèse qu'une surface d'érosion supérieure, cuirassée, aurait disparu au Dahomey, et que la plupart des sols rouges seraient le résultat d'un transport, plus qu'un produit d'altération in situ. S'il paraît difficile d'accepter entièrement cette théorie, il est cependant établi que des colluvionnements importants existent le long des vallées plus ou moins inactuelles. Des niveaux de gravillons gréseux roulés les mettent souvent en évidence et des débris de poteries enterrées ont également été trouvés. Ces sols, nettement plus sableux que ceux des plateaux proprement dits, sont peut-être entièrement colluvionnés. Leur caractère de rubéfaction serait alors hérité et non acquis en place.

Enfin, le modelé des plateaux présente une originalité importante, celle de dépressions fermées circulaires. Ces dépressions, peu étendues, citées surtout dans la région d'Agonkame (WILLAIME et VOLKOFF, 1966) ne sont pas très profondes. C'est souvent la photographie aérienne qui permet de les repérer. Elles sont particulièrement bien signalées sur la carte au 1/50.000 Porto-Novo 4 a. La densité la plus élevée est située le long du cours du fleuve Ouémé, axe de drainage le plus actif du pays.

2.2 - Place des sols sur les modelés

Les sols "rouges" envahissent pratiquement tous les plateaux et les pentes supérieures des axes de drainage. Seuls les fonds de ces derniers possèdent des sols hydromorphes. Sur les plateaux, les dépressions fermées ont parfois des sols nettement différents de ceux des sols "rouges" car les profils sont beiges, faiblement à moyennement concrétionnés, souvent riches en sables fins. Les caractères hydromorphes sont en rapport avec le système endoréique des dépressions. Ces dernières, souvent alignées, ne s'expliquent bien

que par un soutirage au vide. Il y aurait des entraînements de produits solubles en profondeur, soit dans les sols, soit dans les niveaux d'altération. Des affaissements localisés traduiraient ce phénomène en surface, où un colluvionnement secondaire pourrait survenir. Ces plateaux sont en effet très perméables, et il n'y a que peu de ruissellement superficiel. Des études sur l'érosion ont été entreprises par la méthode des cuves réceptrices (WILLAIME, 1965 c ; VERNEY et VOLKOFF, 1966 ; VERNEY, 1967) et elles ont confirmé que l'intensité de l'érosion était faible sur les terres de barre. Cette intensité est d'ailleurs nettement inférieure à celle mesurée au Sénégal (ROOSE, 1965).

3) En Haute-Volta

3.1 - Le type de modelé

Le modelé aplani de la région où se situent les sols rouges, a été souligné par plusieurs auteurs. Mme DAVEAU (1960) note les vallonnements peu marqués, les lignes douces, mais souligne la difficulté de séparer les formations sablo-argileuses rouges des reliefs cuirassés, souvent doléritiques qui les surmontent. L'auteur en déduit la nature remblayée des formations dont le modelé de plateau est une des surfaces d'aplanissement étagées.

MAIGNIEN et BOCQUIER (1961) décrivent la dissymétrie structurale de certaines vallées, dont les versants sont adossés à des reliefs résiduels cuirassés monoclinaux, vestiges d'une altération ferrallitique. Ils ajoutent que la terre de barre de la région de Banfora dérive du démantèlement du massif gréseux voisin, avec présence de phénomènes de cuirassement et de lessivage. GUICHARD (1966 b) insiste sur la dichotomie faible du réseau hydrographique, et sur la présence de longues surfaces, en forme de toit très ouvert, se raccordant de part et d'autre à des thalwegs. Ces derniers sont à marche d'escalier dans leur sens longitudinal, avec quelques griffes d'érosion. Le type de modelé est donc voisin de ceux définis en Casamance et au Dahomey.

3.2 - Les sols sur le modelé

Dans la région située entre Bobo-Dioulasso et Orodara, les sols rouges envahissent tout le modelé. Les profils présentent parfois des phénomènes locaux de remaniements, en particulier des lits de gravillons roulés de grès. Ces phénomènes de remaniement sont surtout nets près de la falaise qui

limite les grès et les granites, et le long des rares grandes dépressions du réseau hydrographique. En aval de cette falaise, près de Banfora, des sols rouges ont été décrits, mais leur assimilation aux sols rouges ferrallitiques n'a pas été retenue (MOREAU, 1966). En effet, les profils n'ont pas les caractères de profondeur et de friabilité reconnus classiquement aux sols "rouges". La cohésion élevée, la présence de concrétionnements incitent à les rattacher aux sols ferrugineux tropicaux. Mais sur le plan géomorphologique, les matériaux de Banfora sont des colluvionnements souvent polyphasés, parfois liés par des niveaux gravillonnaires. Un rapprochement s'impose aussitôt à l'esprit, entre ces sols sur glacis récents et ceux sur colluvions de Goudiry au Sénégal, où l'hypothèse de profils lithochromes a été envisagée.

Cependant, sur les plateaux, les sols ne contiennent pas d'éléments grossiers roulés. JENNY (1963) décrivant les sols de Farako-Ba, note ce fait, bien que les pentes aient plus de 2 Km de longueur. Cependant, près d'Orodara, certains profils contiennent des niveaux gréseux en voie de démantèlement et ces niveaux gréseux semblent en place. Ils indiquent une digestion incomplète des grès par la pédogénèse.

Quand on remonte vers le Nord, les sols rouges sont de moins en moins dominants sur le modelé et des affleurements de grès cuirassé de plus en plus nombreux ceinturent les secteurs à sols rouges. Dans certains cas, des gravillons apparaissent en surface, surtout au sommet des pentes. Ils sont en rapport avec des cuirasses sommitales démantelées dont certaines, d'allure bauxitique, correspondraient à des pointements doléritiques. Enfin, il faut noter que les nappes phréatiques, situées vers 20 mètres de profondeur à Orodara, sont en général situées plus profondément dans les régions plus septentrionales.

3.3 - Conclusions

Les sols rouges envahissent tout le modelé lorsque la pluviométrie annuelle dépasse 1.100 mm. Entre 1.100 et 900 mm, les sols diminuent d'importance et se limitent de plus en plus aux surfaces les plus anciennes. Les phénomènes d'érosion sont alors nettement plus accusés sur le terrain, c'est dire que l'équilibre pédogénèse- morphogénèse se déplace au profit de cette dernière.

4) Conclusions sur le rôle de la "géomorphologie"

Dans les trois régions étudiées, les sols rouges sont répartis sur un modelé de type plateau, mollement ondulé, avec un réseau hydrographique très lâche. Le drainage interne de ces plateaux est excellent. Cependant une liaison a pu être établie entre les données climatiques et la position des sols dans le paysage. Quand la pluviométrie croît, jusqu'à un certain seuil, les sols rouges envahissent tout le modelé bien drainé. Quand la pluviométrie décroît, les sols se limitent aux surfaces les plus anciennes, également les mieux drainées extérieurement. Les phénomènes de morphogénèse deviennent alors de plus en plus marqués sur le terrain. Ces observations sont en accord avec l'hypothèse, formulée précédemment, de l'évolution actuelle de certains sols rouges. Cependant, certaines différences de répartition des sols sur les modelés, que présentent les trois pays, ne sont pas entièrement expliquées. Il semble qu'elles pourraient l'être par une meilleure connaissance de l'histoire des sols au cours du Quaternaire. Exprimé différemment, c'est dire qu'un nouveau facteur est à prendre en considération, l'âge des différents sols.

D - LES FACTEURS D'ORDRE BIOLOGIQUE

Sous ce titre sont regroupés :

- le rôle de la végétation
- les activités de la faune et des microorganismes
- les activités humaines.

1) La couverture végétale

1.1 - Les types de végétation

Il n'est pas utile de séparer les trois régions retenues dans cette étude car la végétation, telle qu'elle se présente actuellement, offre trop de variabilité dans ses aspects physiologiques.

Des secteurs limités de forêt dense existent près d'Oussouye au Sénégal et près de la frontière nigérienne au Dahomey. Cette forêt dense, à tapis herbacé faible, est développée sur des sols qui sont parmi les plus caractéristiques et les plus profondément rubéfiés. Mais ces régions sont également parmi les plus pluvieuses. Il est donc difficile de séparer les rôles respectifs

du climat et de la végétation qui en est très dépendante, et qui par son rôle de protection limite les possibilités d'érosion. Les surfaces les plus importantes sont cependant représentées par des forêts claires, et par leurs faciès de dégradation que sont les savanes arborées (en Casamance), le bush plus ou moins fermé, ou taillis dense (au Dahomey). Par contre au Sénégal, au nord de la Gambie, en Haute-Volta, et dans l'ouest du Togo, le couvert végétal est très ouvert, du type des savanes arbustives à tapis graminéen important. Mais tous les stades de transition existent, des forêts sèches soudaniennes, (AUBREVILLE, 1950 ; ADAM, 1965) aux cultures nues. La liaison climat-couvert végétal est donc très perturbée par l'occupation humaine, et le rôle de la végétation dans la pédogénèse est difficile à préciser.

1.2 - Le rôle pédogénétique de la végétation

Certains auteurs ont conclu à la nécessité de la présence d'une forêt pour la genèse des sols rouges faiblement ferrallitiques (MAIGNIEN, 1962). Les raisons en sont les suivantes : outre la concordance, signalée plus haut, entre les plus beaux profils et la pluviométrie la plus élevée, la différenciation très progressive de ces profils, leur grande profondeur et leur homogénéité, sont des caractères courants des sols ferrallitiques sous forêt dense équatoriale. Il est donc logique de considérer les types de végétation forestière, qui existent encore sur des sols rouges, comme climaciques. Les autres types de végétation seraient des faciès de dégradation.

L'étude des profils hydriques sous forêt et sous culture (TOBIAS et CHAUVEL, non publié) indique que les courbes hydriques les mieux adaptées, graphiquement, aux variations texturales des profils, concernent les cas sous forêt. Par évapotranspiration, cette dernière dessècherait régulièrement et profondément les profils et cette possibilité est confirmée par les nombreuses observations de racines à plus de six mètres. L'utilisation des réserves en eau de façon homogène par une végétation pérenne peut se poursuivre pratiquement toute l'année. C'est peut-être une des explications de la rubéfaction, dans la mesure où on relie ce phénomène à un dessèchement lent, en milieu oxydant, des hydroxydes de fer. Par contre, sous savane, la grande majorité des sols, autres que les sols rouges, présentent des profils très différenciés, riches en concrétions diverses, avec des caractères de pseudo-gley à plus ou moins grande profondeur. Ces caractères indiquent des discontinuités dans les régimes hydriques.

Toutes les observations qui précèdent rendent plausible le rôle de la végétation forestière dans la conservation des profils de sols rouges. Mais leur rôle éventuel dans l'orientation de la pédogénèse vers un sol de type rouge plutôt que vers un autre type n'est pas établi. Cependant, il a été vérifié en Casamance que les transformations du couvert végétal se traduisaient très rapidement par une modification du pédoclimat des horizons supérieurs, par des pertes de matière organique et d'azote, et par une accélération des actions érosives par ruissellement. Dans ces conditions, il est logique d'attribuer aux changements de végétation un rôle pédogénétique important. AUBERT (1959) avait insisté sur ce point.

Ces remarques prennent toute leur importance quand on se réfère aux changements climatiques qui ont eu lieu au Quaternaire et qui ont donc dû se traduire par des modifications importantes des types de couvert végétal. Cette hypothèse est corroborée par les botanistes qui ont accumulé un certain nombre de preuves (AUBREVILLE, 1949 et 1962). Ainsi le passage en Basse-Casamance (AUBREVILLE, 1949), sur quelques kilomètres, d'une forêt à *Parinari excelsa*, considérée comme primaire, à des bushes, des cultures à réserves d'arbres, des palmeraies, des savanes boisées, définit les maillons d'une évolution régressive ou progressive évidente. Le même auteur, par étude des formations et de leurs espèces considère que la région côtière du Dahomey a été anciennement couverte d'une formation littorale de forêt dense, remplacée dans de nombreux cas par des palmeraies d'origine anthropique.

La couverture végétale représente donc un facteur important dans la genèse et la conservation des sols rouges. Son rôle s'explique par le mode de régime hydrique qu'établit une végétation pérenne dense, et par les conséquences de ce régime sur le phénomène de rubéfaction. Les modifications de couverture végétale ayant été nombreuses au Quaternaire, les sols ont dû en supporter les conséquences.

2) Les activités des animaux et des microorganismes

2.1 - Les actions animales

Les actions animales sont surtout le fait de la faune du sol, en particulier termites, fourmis, vers ou des animaux fouisseurs. Les termitières cathédrales sont parfois très nombreuses dans les régions soudaniennes. Pourtant

comparativement aux autres sols, elles sont nettement moins bien représentées sur les sols "rouges" et dans certaines régions elles semblent même être absentes. Les termitières dites "champignons" n'ont pas été observées sur des sols "rouges", probablement parce que le drainage est trop bon. D'autres espèces que les termites ont été rendues responsables de remaniements dans les sols (BALDENSPERGER, STAIMESSE et TOBIAS, 1969 ; FAUCK, MOUREAUX et THOMANN, 1969). Précédemment nous avons décrit la richesse chimique des rejets de vers dans certains sols du Sud-Dahomey. Mais une telle action ne peut être généralisée, et il est donc difficile de lui attribuer un sens pédogénétique précis. Pourtant, certains auteurs ont insisté sur l'influence des organismes vivants sur la pédogénèse elle-même (NYE, 1955 ; BACHELIER, 1963 ; LEVEQUE, 1969 a). En particulier, le mécanisme de l'appauvrissement des horizons supérieurs est mal connu. Mais certains auteurs admettent qu'il se réalise en surface par érosion sélective. Ensuite cet appauvrissement est transmis progressivement en profondeur par des actions biologiques remaniant progressivement toute la partie supérieure des sols (ROOSE, 1968 a ; BEAUDOU, 1970). Les seules observations faites sur le terrain ne permettent cependant pas de prendre position sur cette question.

2.2 - Le rôle des microorganismes

Les activités microbiologiques sont multiples, mais leur action la plus importante concerne la biodégradation des substances organiques. Leur rôle dans le phénomène de l'appauvrissement est également plausible. Cependant l'ensemble de ces questions sera repris en seconde partie, lors de l'étude des mécanismes de la pédogénèse.

3) Les actions humaines

Le rôle de l'homme dans la pédogénèse est multiple :

- il modifie la couverture végétale par déforestation, avec ou sans dessouchage et par mises en culture annuelles ou pérennes.
- il travaille le sol plus ou moins superficiellement.

La brusque modification de la couverture végétale par l'homme a surtout des conséquences sur le pédoclimat et en particulier sur le bilan hydrique :

- le ruissellement est augmenté et l'érosion activée. A Séfa, les sols rouges ont été spectaculairement érodés en ravines après enlèvement de la forêt quand les pentes dépassaient 2 à 3 %.

- le profil hydrique du sol est perturbé, et certains niveaux du profil sont asséchés plus vigoureusement par la nouvelle végétation,
- le bilan hydrique global est modifié, l'intense évapotranspiration de la forêt étant plus ou moins annulée. Ainsi, à Séfa, les défrichements des plateaux ont coïncidé avec des modifications du niveau de la nappe. Après dix années de cultures continues, avec limitation du ruissellement par un dispositif anti-érosif, les nappes ont remonté de plus de 8 mètres dans les puits. L'examen des cycles pluviométriques n'a pas indiqué une modification sensible du total pluviométrique. L'augmentation de la percolation vers la base des profils est donc une des conséquences probables des actions humaines de mise en valeur.

4) Conclusions

Les facteurs de pédogénèse d'origine biologique sont variés et d'importance inégales. Certains ont dû jouer un rôle dans le genèse des sols rouges, ou dans leur conservation. Ce serait le cas d'une couverture forestière. D'autres peuvent provoquer, soit un changement de l'équilibre morphogénèse-pédogénèse, soit une modification du régime hydrique. C'est le cas des actions humaines. D'autres, enfin, pourraient être tenues pour responsables de la morphologie particulière des horizons supérieurs appauvris. Ce serait le cas de la faune du sol.

E - CONCLUSIONS SUR LES FACTEURS DE DIFFERENCIATION

L'étude de la répartition géographique des sols rouges nous a indiqué les limites pluviométriques entre lesquelles ces sols se conservent et peut-être continuent à se développer actuellement. La caractérisation des roches-mères dans les trois pays considérés a mis en évidence certains de leurs traits communs. Elle a amené à conclure que les roches-mères ont un rôle essentiel, mais non suffisant dans le développement de la pédogénèse rubéfiante. L'influence de la végétation et des actions animales et humaines a été admise, soit au stade de la différenciation des sols, soit au stade de leur conservation. Enfin, l'examen de la géomorphologie comme facteur pédogénétique a indiqué l'existence d'interactions entre le climat et la répartition des sols sur les

modelés. Le mécanisme commun de ces interactions apparaît être le bilan hydrique des sols, c'est-à-dire la répartition dans le temps et l'espace de l'eau dans les profils.

L'étude critique de tous ces facteurs a conduit à admettre que certains sols rouges seraient résiduels mais que d'autres continueraient actuellement leur évolution dans le même sens. La réalité de changements climatiques au Quaternaire nous a confirmé dans cette opinion. Mais elle a également soulevé le problème de l'âge réel des sols en introduisant un facteur supplémentaire, le temps.

Certains caractères peuvent être hérités de périodes climatiques disparues, et ne pas être forcément spécifiques de l'évolution des sols rouges. D'un autre côté, il est possible que certains sols sur grès ont été autrefois des sols "rouges" et qu'ils en ont gardé cependant quelques caractères hérités, pseudo-sables par exemple. Les pédologues ont insisté sur l'importance dans les régions tropicales (De HEINZELEIN, 1952 ; MAIGNIEN, 1960) de ces caractères hérités, mais leur recherche est difficile. En effet, certaines des caractéristiques des sols mettent très longtemps à se mettre en place, tandis que d'autres s'établissent plus rapidement (LENEUF et AUBERT, 1960).

En fait, il y a souvent surimposition d'évolution successives. A certaines époques les sols se sont approfondis, à d'autres ils ont gardé les caractères acquis, mais se sont érodés partiellement, à d'autres leurs horizons supérieurs ont pu être orientés vers une autre morphologie. La répartition actuelle des sols rouges est donc la somme d'un ensemble d'évolutions successives, parfois dans le même sens, parfois divergentes. Certains profils sont probablement très vieux, leur évolution ayant commencé dès avant le début du Quaternaire. A certaines époques, ces mêmes sols couvraient peut-être au Sénégal et en Haute-Volta des régions importantes, situées même plus au nord que l'isohyète actuelle de 800 mm. Les entailles de certains fleuves fossiles (Ferlo) sont des indices de l'étendue de la remontée vers le nord des climats très humides du Quaternaire ancien et moyen. D'autres profils ne datent peut-être, non plus d'un million d'années, mais de 30 ou 40.000 ans ou même 6.000 à 10.000 ans, dernières périodes humides importantes.

Dans ces conditions, afin de mieux séparer ce qui revient aux facteurs climats, roche-mère et végétation, et ce qui est explicable par le facteur supplémentaire temps, nous avons recherché des arguments dans l'étude d'autres sols tropicaux. Il s'agit des sols qui n'ont pas la morphologie des sols "rouges" mais qui se sont différenciés sur sables et sur grès. Il s'agit également de sols qui ont les caractères morphologiques des sols "rouges," mais dont les roches-mères ne sont pas des sables et des grès. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

LES AUTRES SOLS SUR SABLES ET SUR GRES

Généralités -

Il n'est pas aisé de séparer ce qui est dû aux différents facteurs de la pédogénèse, climats, roches-mères, modelés, actions biologiques, auxquels s'ajoute un facteur temps. Mais, sur les sables et les grès, tous les sols ne sont pas du type "rouge", même quand le climat est comparable. D'autre part, il y a des sols, apparemment identiques aux sols rouges, et qui existent sur des roches-mères différentes des sables et des grès.

Nous avons pensé que l'examen critique de tous ces cas aiderait à préciser l'importance relative des différents facteurs. Les données nous ont été fournies, partiellement, par une étude bibliographique. Elles sont, de ce fait, de précisions inégales. La méthode suivie est de rendre constant, tour à tour, certains des principaux facteurs. Le plan de ce chapitre en découle.

1) Les roches-mères et le climat sont retenus comme des constantes approximatives, les sols sont variables. On étudie les sols dits "associés" qui voisinent géographiquement avec les sols rouges, dans les trois régions retenues, tout en leur étant nettement différents. Les variables sont surtout la position sur le modelé et le facteur temps.

2) Les matériaux originels représentent une constante. Cette constante est envisagée en ne retenant que les roches-mères identiques à celles sur lesquelles ont été définis les sols précédemment inventoriés, c'est-à-dire des grès et des sables argileux, du type des continentaux terminaux. En fait, la gamme des possibilités est très grande puisque aux grès pourraient être ajoutés de nombreuses alluvions et colluvions ainsi que la masse des sables éoliens. Pratiquement, nous nous sommes limités à quelques cas bien connus sur le plan pédologique et dont la représentativité géographique est importante. C'est sur-

tout le climat, essentiellement sous l'angle pluviométrie annuelle, qui devient la variable dominante, les autres facteurs, modelé et temps, étant considérés en second lieu.

Sur ces "matériaux constants", deux cas seront envisagés :

- celui où il y a des sols rouges similaires à ceux du chapitre I, les sols peuvent être alors appelés "comparables" ;
- celui où ils ne le sont pas : sols "différents".

3) Les sols représentent une constante. Il s'agit d'analyser les conditions de milieu des sols similaires, sols qui peuvent être assimilés morphologiquement aux sols rouges, mais développés sur des roches-mères variées. Outre les roches-mères, les facteurs climats et temps sont des variables complémentaires.

Dans chacune des trois "approches" ci-dessus définies, le but restera le même : essayer de dégager des faits communs, dont l'interprétation permettra de préciser le rôle respectif qu'ont pu avoir les facteurs de différenciation dans la genèse des sols rouges.

A - LES SOLS "ASSOCIES" AUX SOLS ROUGES

L'importance des sols dénommés "associés" aux sols rouges est très variable selon les régions.

1) Au Sénégal

1.1 - En Moyenne-Casamance

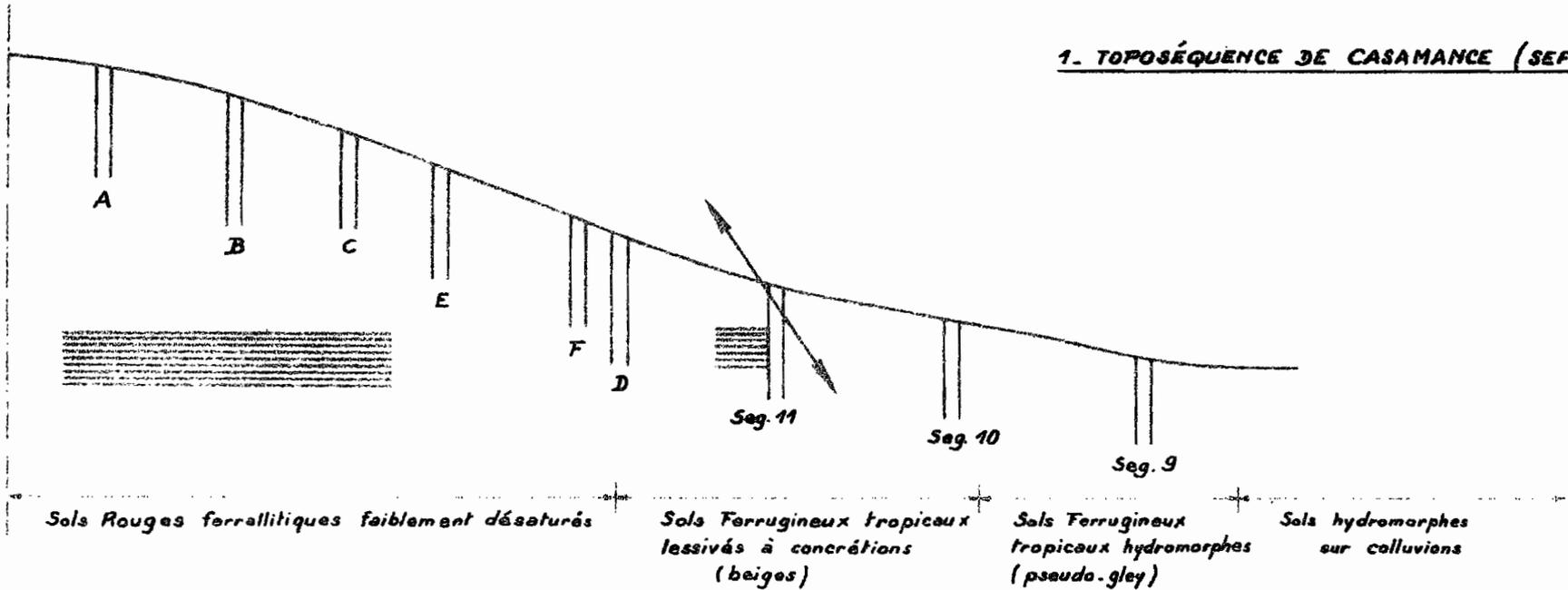
Dans cette région, où les profils rouges sont les plus typiques, la répartition des sols sur le modelé est schématisée par la figure A 4. Les sols associés bien drainés sont tous classés en ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions. Ils sont de deux types :

a) des sols beiges de plateau

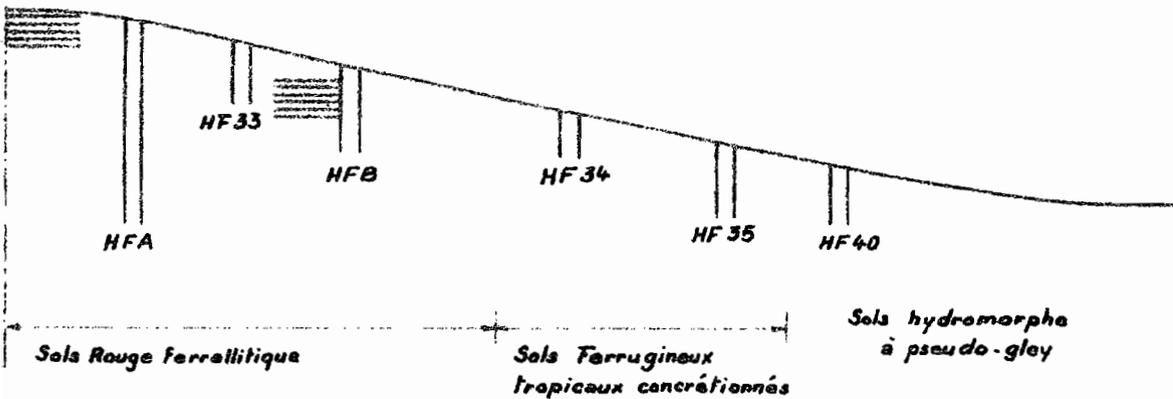
Ils contiennent des concrétions ferrugineuses entre 60 et 100 cm, précédés entre 40 et 60 cm de taches rouges et ocres dans une matrice jaune. Les textures sont sablo-argileuses, en surface, argilo-sableuses, en

DANS LES TOPOSÉQUENCES

1. TOPOSÉQUENCE DE CASAMANCE (SEFA)



2. TOPOSÉQUENCE DE HAUTE-VOLTA (ORODARA)



Légende

A Numéros des profils et des puits

Niveau de grès cuirassé

Troncature par érosion d'après L. SÉGUY

Echelle des longueurs : 1cm = 125 mètres

échelle des hauteurs : 1cm. = 5 mètres

profondeur. Certains profils ont des niveaux de pseudo-gley à partir de 1,50 m. Dans les horizons C, ces pseudo-gley peuvent se poursuivre très profondément. Les structures sont variables en surface. Mais, en profondeur, la structure est du type polyédrique à cohésion moyenne à forte. Dans certains cas, des pseudo-sables ont été observés à l'oeil. Ils semblent moins bien différenciés, ou apparents, que dans les sols rouges. S'il était établi que ces pseudo-sables sont spécifiques aux sols rouges, cela indiquerait que les sols beiges dériveraient de ces derniers par une pédogénèse plus récente. C'est une hypothèse de travail.

b) Les sols beiges de pente

Ils se répartissent sur la partie inférieure ou moyenne des pentes. Deux cas peuvent être distingués selon que la transition aux sols "rouges" du haut des pentes est rapide, ou au contraire très progressive. Cependant SEGUY (1969) a noté que le passage du type rapide correspondait, à Séfa, à l'existence d'un remaniement. Ce dernier aurait donc eu pour conséquence d'orienter la pédogénèse dans un sens différent sur la nouvelle surface installée. C'est dire que les sols beiges de ce type n'ont pas le même âge que les sols rouges. MAIGNIEN (1962), a conclu logiquement que les sols actuels, sur les surfaces les plus récentes, sont du type ferrugineux tropical. Les sols rouges, sur les surfaces anciennes seraient donc relictés. Mais il n'a pas été possible de confirmer la généralisation des remaniements.

1.2 - En Basse-Casamance

Certains plateaux sont couverts de sols jaunes profonds, qui diffèrent des sols beiges de plateau de Moyenne-Casamance, par l'absence de concrétionnement. Ces sols jaunes ont la morphologie des sols ferrallitiques : profondeur élevée, transitions très progressives. Les deux caractères distinctifs vis-à-vis des sols rouges sont la couleur, et le rapport fer/argile qui est très bas. Mais ces deux types de sols ne sont pas associés dans les toposéquences et la cause de leur différenciation est difficile à exprimer, des différences de matériaux ayant peut être un rôle important.

1.3 - Dans le reste du Sénégal

Il s'agit des régions à pluviométrie annuelle inférieure au mètre. Les sols qui dominent sont les sols ferrugineux tropicaux à taches, ou à concrétions, plus ou moins lessivés en surface. Les horizons B sont bien individualisés, ce qui les font définir comme B texturaux. PIERI (1969) a noté l'importance des remaniements : sur 147 profils étudiés près de Nioro-du-Rip, 63 avaient des marques indiscutables de polyphasage. Dans ces conditions, le passage d'un sol rouge à un sol beige est généralement marqué d'une discontinuité rapide. Les affleurements de cuirasse sont nombreux, surtout près de Goudiry et de Vélingara, mais près de Nioro-du-Rip ces cuirasses sont très démantelées.

1.4 - Conclusions

Au Sénégal, le changement de type de sol, à conditions climatiques et géologiques égales, correspond à deux cas :

a) différence d'âge en rapport avec des remaniements. Les surfaces récentes portent des sols plus jeunes qui évoluent actuellement dans le sens des sols ferrugineux tropicaux.

b) différence d'emplacement sur les modelés. Les sols beiges se trouvent :

- soit sur la partie inférieure des pentes, dont le pédoclimat est influencé par celui existant dans les sols rouges en amont,
- soit sur des plateaux mal drainés.

Cependant, ce changement de type de sol se réalise différemment selon les types de climat. Les sols ferrugineux tropicaux envahissent progressivement les modelés au fur et à mesure que la pluviométrie décroît d'une part, que l'importance des remaniements croît d'autre part. Le changement de type de sol se caractérise par la perte de la couleur rouge, par la mise en place de concrétions ferrugineuses, par une différenciation en horizons plus marqués. HILL (1968) a noté la progressivité du changement de couleur. Mais CHAUVEL (1966) a observé que ce changement se réalisait en premier lieu dans les horizons de surface. Cela tendrait à prouver que de nombreux sols de transition proviennent de l'évolution d'anciens sols rouges.

Le changement de type de sol se réalise également par une modification des caractéristiques structurales. Progressivement, la structure devient plus large, massive, et la cohésion des agrégats et des débits augmente. Les caractères de friabilité et de porosité diminuent nettement. Dans des cas précis, une augmentation de la densité apparente a été notée. La modification de la coloration est donc systématiquement liée aux autres modifications structurales, et c'est sur la généralisation de cette relation que nous basons, sur le plan classification, la séparation des sols "rouges" de cette étude de celle des sols dits "associés".

En bref, les sols ferrugineux tropicaux apparaissent au Sénégal comme caractérisant la pédogénèse actuelle. Les sols rouges seraient en déséquilibre et ils se conserveraient par un phénomène d'hysteresis (MAIGNIEN, 1962). Cependant, entre 1.200 et 1.400, ou 1.500 mm, de pluviométrie où la couverture de sols rouges est très importante, il n'est pas exclu que deux types de pédogénèse se poursuivent simultanément, selon le type de bilan hydrique défini par la place sur le modelé.

2) Au Dahomey et au Togo

2.1 - Régions est et centre

Dans les régions est et centre, c'est-à-dire surtout le Dahomey, il y a très peu de sols bien drainés qui ne soient pas rattachés à l'ensemble des sols "rouges". Seuls, des profils de couleur beige, avec des taches ferrugineuses, sont parfois signalés. Ils sont alors en relation avec des zones dépressionnaires ou avec certains bas de pente sableux. Il y a rarement des toposéquences sol rouge - sol beige ferrugineux tropical - sol hydromorphe aussi bien individualisées qu'au Sénégal. Pourtant, les conditions pluviométriques sont comparables. Mais le modelé de plateau, avec des pentes plus faibles qu'en Casamance, n'est pas tout à fait le même qu'au Sénégal. De plus, la répartition des pluies dans le temps est différente.

2.2 - Région ouest

Il s'agit du Togo où de nombreuses toposéquences avec sols ferrugineux tropicaux beiges ont été décrits (LAMOUROUX, 1962) et également du

sud-ouest du Dahomey, WILLAIME (1961) a fourni une coupe schématique de la région d'Agamé (sud-ouest du Dahomey), où est indiquée la présence de sols ferrugineux lessivés à hydromorphie de profondeur. Leur genèse semble en rapport avec la circulation des nappes se déversant dans les axes de drainage. Des sols beiges sableux sur colluvions, déjà signalés dans le sud-est, sont situés, soit en bas de pente sur des matériaux dont le remaniement est certain, soit dans les dépressions fermées. Dans ce dernier cas, outre la couleur et le concrétionnement, le fait essentiel est l'importance des caractères de pseudo-gley en profondeur. Il y a donc convergence de faciès avec les sols beiges de plateau de la Moyenne-Casamance.

2.3 - Conclusions

Comparée au cas du Sénégal, cette extension relative, beaucoup plus grande, des sols rouges au Dahomey peut être mise en rapport :

- soit avec une répartition différente des pluies (deux saisons),
- soit avec un âge différent des sols.

En effet, il n'y a peut-être pas eu, au Dahomey, de période climatique ancienne aride et érosive s'étant traduite par des remaniements nombreux. Une pédogénèse nouvelle n'aurait donc pas pu s'installer sur des surfaces suffisamment récentes. Au Togo, où la pluviométrie décroît rapidement, l'importance des sols associés (ferrugineux beige à concrétions) augmente nettement. Leur relation avec des matériaux colluvionnaires semble systématique et on se trouverait donc dans le cas du nord de la Gambie, au Sénégal.

Cependant, des sols rouges ont été décrits sur matériaux colluvionnaires au Dahomey. Leur existence montrerait que depuis ces remaniements, le sens de l'évolution n'a pas varié fondamentalement. Malheureusement, il est délicat de comparer l'âge des remaniements dans les deux pays et il est impossible de préciser les diverses successions climatiques qu'ils ont pu subir jusqu'à nos jours.

Dans ces conditions, la rareté, au Dahomey, des sols beiges hydromorphes de plateau (qu'ils soient classés ferrugineux ou faiblement ferralitiques) semble plutôt être en relation avec une différence de régime hydrique, en rapport avec l'étalement de la pluviométrie.

3) En Haute-Volta

3.1 - Région sud

Il s'agit surtout de l'axe Bobo-Dioulasso à Orodara.

Deux toposéquences ont été définies :

a) sols rouges sur les parties hautes et moyennes des modelés - sols rouges remaniés en bas de pente - sols hydromorphes le long des thalwegs.

b) sols rouges - sols beiges à taches ferrugineuses puis à pseudo-gley - sols hydromorphes. Dans ce dernier cas, les sols rouges occupent cependant la plus grande partie des pentes, et les sols beiges sont très limités en superficie. L'importance éventuelle des remaniements n'a pas été précisée.

3.2 - Région nord

Au nord de l'isohyète 1.100 mm, on observe surtout la toposéquence schématique suivante :

a) en sommet, des affleurements de grès, peu étendus, mais toujours très démantelés,

b) en haut de pente, et à mi-pente, des sols rouges ferrallitiques, de profondeur généralement inférieure à celle de leurs homologues de la sous-région sud. Leurs caractères sont les suivants :

- tendance à une structuration massive de l'horizon B avec perte des caractères de friabilité,
- apparition de caractères hydromorphes (taches diffuses) à 1,5 ou 2 mètres de profondeur,
- fréquence des remaniements définis par des lits de gravillons,
- texture sablo-argileuse des horizons B, la moyenne des teneurs en éléments fins étant sensiblement inférieure à celle des sols situés au sud. Ce fait rappelle le cas des sols de Nioro-du-Rip et de Goudiry, au Sénégal.

c) Sur la moitié inférieure des pentes : des sols, classés ferrugineux tropicaux lessivés appauvris, sous-groupe hydromorphe. Il s'agit de profils de couleur beige avec, comme caractère essentiel, la présence de

pseudo-gley dans la partie moyenne et inférieure des horizons B. Les traces de remaniement sont assez nombreuses.

3.3 - Conclusions

La toposéquence sol rouge - sol beige concrétionné est de plus en plus représentée en allant de la région sud vers la région nord, plus sèche. Les sols beiges augmentent également en proportion sur les pentes, mais les caractères de remaniements deviennent également plus nombreux. Ce schéma est comparable à celui défini au Sénégal, en allant de la Casamance vers le nord de la Gambie. Il est également voisin de celui observé au Togo, sous un total pluviométrique comparable.

4) Conclusions sur les sols "associés"

Les sols "associés" aux sols rouges ont essentiellement les caractères suivants :

- couleurs beige ou jaune ;
- concrétionnement en fer dans les horizons B ;
- caractères de pseudo-gley de plus en plus proches de la surface quand on se déplace vers le bas des pentes ;
- augmentation de cohésion assez marquée dans les horizons supérieurs.

Les sols "associés" se trouvent dans les mêmes conditions climatiques que les sols "rouges" situés en amont. Ils ne se trouvent pas toujours sur les mêmes roches-mères, puisque celles-ci ont souvent été remaniées par des cycles récents de morphogénèse. Ils ne se trouvent pas non plus dans les mêmes conditions de pédoclimat, car leur évolution est influencée par celle des profils situés en amont (drainage oblique). Les facteurs roches-mères, modelé et temps peuvent donc être très différents malgré la faible distance qui existe entre les profils sur le terrain.

Il est probable que de nombreux sols de couleur beige, classés le plus généralement en ferrugineux tropicaux, représentent la pédogénèse actuelle sur des surfaces géomorphologiques récentes. Cependant, il n'a pas été possible de définir partout la réalité de ces surfaces. De plus, dans le sud-est

du Dahomey, et dans la région d'Orodara, en Haute-Volta, les sols sur les surfaces considérées comme les plus récentes du fait des remaniements, sont à rattacher aux sols rouges. Il est donc possible que dans certaines conditions de pluviométrie, la position sur le modelé permette l'évolution actuelle de deux types de profils :

- a) rouge sur les sommets de pentes
- b) beiges concrétionnés en bas de toposéquence.

L'étude des bilans hydriques à l'échelle de ces toposéquences, et l'évolution dans le temps de ces bilans serait à entreprendre pour vérifier cette hypothèse. Les données recueillies actuellement ne le permettent pas. En tout état de cause, il n'est pas possible d'étudier les sols dits "associés" indépendamment des sols rouges qui les dominent topographiquement dans les toposéquences. Par contre, les sols rouges, toujours situés en amont, quelles que soient les conditions, peuvent être étudiés à part. C'est une des raisons pour laquelle ils font, seuls, l'objet de ce mémoire.

B - LES SOLS SUR SABLES ET SUR GRES DANS D'AUTRES REGIONS

Les superficies de roches sableuses et gréseuses sont importantes dans certaines régions d'Afrique et de Madagascar. Les sols qui les recouvrent sont variés. Les données recueillies dans la bibliographie nous permettent parfois de les comparer aux sols rouges. Deux cas sont à distinguer :

- a) celui où les sols rouges "comparables" existent sur les sables et les grès, avec des sols "associés" en quantités plus ou moins importantes.
- b) celui où il n'y a pas du tout de profils de type "rouge".

Dans les deux cas, les matériaux représentent une constante approximative. Les facteurs variables sont d'abord le climat, ensuite la géomorphologie et l'âge des sols.

1) Les sols comparables aux sols rouges

Les exemples les mieux définis, tant au point de vue de la représentativité géographique que des données recueillies sur les profils, sont les suivants :

- sols rouges faiblement ferrallitiques sur séries sableuses sédimentaires du Tchad,
- sols rouges ferrallitiques sur grès du Continental terminal au Niger,
- sols rouges sur grès primaires au Nord Dahomey et au Nord Nigéria,
- sols rouges sur Continental terminal de l'Angola et du Mozambique,
- sols rouges sur sables et sur grès de Madagascar.

1.1 - Au Tchad

1.1.1 - Les roches-mères

Les matériaux sont des sables, des sables argileux et des grès d'un Continental terminal (PIAS, 1960 a, 1960 b, 1964 b, 1967 ; SIEFFERMANN, 1963 ; MARIUS, 1964 etc...). L'ensemble est généralement désigné sous le mot local de "koro". BOUTEYRE (1961 - 1963) le définit comme une unité géographique caractérisée par l'absence de nappe d'eau à faible ou moyenne profondeur, des vallées sèches peu marquées et peu nombreuses, sorte de plateau descendant en pente douce vers la cuvette tchadienne, dont elle représente les premiers reliefs. Mais ces reliefs sont des étendues mollement vallonnées (PIAS et LENEUF, 1954), et monotones avec des affleurements de grès signalés sur certaines pentes. PIAS (1968) pense qu'il y a souvent une cuirasse ancienne de plateau et une cuirasse récente de thalweg, et que les buttes témoins de sol rouge sont parfois envoyées dans des sédiments plus récents. Les formations de sols rouges s'intègrent, d'après lui, dans quatre types de paysages :

- près de massifs granitiques, des surfaces planes avec présence de buttes témoins de grès, couronnées d'une cuirasse ;
- plus au nord, les plateaux proprement dits de koros, la limite extrême des sols rouges étant le 9° de latitude Nord ;
- des lambeaux accolés à des massifs granitiques ;
- des buttes témoins envoyées dans des terrains sédimentaires plus récents.

1.1.2 - Les sols

Une large bande de sols rouges faiblement ferrallitiques modaux apparaît sur la carte du Tchad, à l'échelle du millionième. Dans la suite nous n'y retiendrons que les sols rouges développés sur matériaux issus du Continental. La bande se termine à la longitude 19° E, couvrant environ 30.000 Km², la feuille de Niellim étant couverte à 32 % (AUDRY et POISOT, 1966). Les seules autres unités cartographiques qui s'intercalent dans la bande sont des sols hydromorphes, des sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions ferrugineuses, et en juxtaposition, des sols ferrugineux lessivés faiblement développés sur matériau rouge ferrallitique ancien, sableux à sablo-argileux. Des profils de sols rouges sont signalés depuis 600 mm de pluviométrie actuelle (GUICHARD et POISOT, 1964) jusque 1.200 mm (Nord Cameroun), mais cette limite sud semble correspondre aussi à la fin de la formation du Continental terminal (GAVAUD, 1970).

Les sols rouges décrits sont généralement très profonds (souvent plus de 4 mètres), homogènes, de texture sablo-argileuse à argilo-sableuse dans les horizons B. Les teneurs en argile supérieures à 40 % sont relativement rares en-dessous de 1.000 mm de pluviométrie. La présence de pseudo-sables est systématique (PIAS et BARBERY, 1964 ; BOCQUIER et BARBERY, 1965), ce qui rapproche ces sols de ceux du Dahomey. La présence exclusive de kaolinite, avec la goethite comme hydroxyde de fer, la généralisation des rapports SiO₂/Al₂O₃ de 1,8 à 2,1 sont d'autres caractères essentiels. Les taux de saturation des horizons B sont faibles, puisque dans de nombreux cas, à Moussafoyo par exemple (MARIUS et BARBERY, 1964) ils sont inférieurs à 40 %.

Enfin la lecture de la description d'un profil de Niellim (N1 202) (AUDRY et POISOT, 1966) nous fournit les précisions suivantes : les couleurs, toujours dans la planche 2,5 YR (code Munsell) varient très peu du sec à l'humide (en sec 4/6, en humide 3,5/6), ce qui semble un caractère général pour tous les sols rouges, et significativement différent du cas des sols ferrugineux tropicaux beiges associés. Les pseudo-sables n'existent pas dans les 37 cm supérieurs, ils deviennent surtout abondants dans la partie moyenne et inférieure de l'horizon B où ils déterminent une porosité élevée et stable. Toutes ces caractéristiques rappellent celles des sols "rouges" du Sénégal.

1.1.3 - Les interprétations

Plusieurs auteurs ont parlé des séries sédimentaires de sables rouges (BOUTEYRE, CABOT et DRESCH, 1964 ; PIAS et POISOT, 1965), parfois des sols ferrugineux sur matériaux rouges ferrallitiques, dans certains cas d'un matériau rouge recouvert de sédiments plus récents. De telles présentations feraient donc penser à un matériau dont la rubéfaction était acquise. En fait, les observations les plus récentes permettent plutôt de conclure à une origine pédogénétique de la rubéfaction, avec certains paléosols enfouis sous des recouvrements récents. En particulier, PIAS déclare que vue l'hétérogénéité de l'origine des matériaux, l'identité d'apparence des sols ne peut s'expliquer que par une évolution pédogénétique commune. Les travaux de BOCQUIER et BARBERY (1965), bien que rappelant la liaison étroite des unités pédologiques avec les unités de matériaux, conduisent à la même conclusion.

Les sols rouges du Tchad ont donc de nombreux caractères communs avec ceux du Sénégal et de Haute-Volta. Ces caractères sont les suivants :

- homogénéité et profondeur des profils rubéfiés, c'est-à-dire équivalence des horizons B diagnostiques ;
- présence de pseudo-sables, de kaolinite, et d'hydroxydes de fer ;
- absence de minéraux altérables ;
- caractères de désaturation des matériaux, et des sols, équivalents à ceux de Haute-Volta ;
- concordance des limites climatiques, 600 et 1.200 mm de pluviométrie annuelle. Cette dernière limite correspond, comme en Haute-Volta, à la fin des formations du Continental terminal.

Au Tchad, comme ailleurs, l'importance des héritages semble élevée. Les sols rouges occupent toujours les surfaces les plus anciennes. Certains niveaux de couleur rouge, enfouis sous des sédiments récents, confirment les hypothèses sur les variations climatiques anciennes (SIEFFERMANN, 1963 ; BOCQUIER et BARBERY, 1965 ; HERVIEU, 1969). Par contre, la profondeur des nappes phréatiques est plus grande qu'en Afrique Occidentale.

1.2 - Au Niger

Des roches-mères du Continental terminal existent au Niger sur de grandes étendues, souvent recouvertes de sables éoliens quaternaires. Ces matériaux géologiques sont comparables à ceux du Sénégal et du Tchad (DIDIER de SAINT-AMAND, 1969). Pourtant les sols rouges n'existent que sur de très faibles superficies, dans la région de Gaya (GAVAUD et BOULET, 1966). Ils se présentent en auréoles autour de lambeaux découpés d'anciens glacis, avec présence de replats cuirassés. Dans les profils il existe parfois des niveaux gravillonnaires, signes de remaniements. La couleur peut atteindre 10 R (Munsell) en profondeur. Les taux de saturation, de l'ordre de 30 % pour les horizons B, donc comparables à ceux du Tchad, sont ceux de tous les types de sols sur le niveau géologique CT 3. Cela indique que ce critère chimique est une caractéristique du matériau et que pour le sol, c'est d'abord un héritage.

Les autres sols issus des grès du Continental terminal du Niger, sont, outre les cuirasses plus ou moins affleurantes, des sols "peu évolués" et des sols ferrugineux tropicaux ou subarides développés sur l'importante couverture sableuse d'origine éolienne qui descend très loin vers le sud du pays. Un certain nombre de ces sols ont des caractères de rubéfaction (planche 2,5 YR), de faible différenciation des profils, de désaturation, de présence exclusive d'argile kaolinitique, qui rappellent, avec une intensité moindre, ceux des sols rouges.

Les sols de Gaya sont donc comparables à ceux du Tchad. Leur existence dans une région où la pluviométrie annuelle est estimée à 870 mm, et où les phénomènes de remaniements ou de recouvrements dunaires sont importants, conduit également à faire un rapprochement avec les sols de Nioro-du-Rip (Sénégal). GAVAUD note enfin que la plupart des profils sont tronqués.

1.3 - Au Nigéria

Dans le sud du Nigéria, la bande de "terres de barre" du Dahomey se prolonge assez loin de la frontière. Les familles de sols décrites par VINE (1959), les Benin Fascs, sont développés sur les Benin Sands, matériaux du Continental terminal. Ce sont des "sols rouges profonds, perméables, bien drainés, à horizon supérieur sans cohésion, recouvrant sur une grande profondeur un sous-sol poreux, sans concrétions, de texture sablo-argileuse à argilo-

sableuse, avec un horizon supérieur généralement modérément acide sous forêt et sous savane, et un sous-sol fortement acide".

VINE a défini ses séries d'après la teneur en éléments fins (argile plus limon) de l'horizon 15 à 27 inches, et les sous-séries d'après la teneur en éléments fins de l'horizon A₁. Certaines de ces séries (Alagba, Orlu, Kulfo et Ahlara) semblent correspondre à des séries du Sud-Est Dahomey. En particulier, la série d'Orlu a des taux de saturation qui décroissent très progressivement en profondeur (de 60 à 38 %), sans horizon Bt, une structuration faible, de la kaolinite exclusivement, et des rapports SiO₂/Al₂O₃ égaux à 2,0. Ces sols se trouvent dans des régions où la pluviométrie dépasse deux mètres, mais en deux saisons des pluies. Lorsque la pluviométrie atteint deux mètres les sols rouges sont associés de plus en plus à des sols jaunes à concrétions. Ces derniers deviennent exclusifs vers l'est. ASHAYE (1969) étudiant certains de ces sols conclut à la réalité des déplacements d'argile et de fer dans les profils.

Dans le nord du Nigéria, HIGGINS et TOMLINSON, (1961), SMYTH (1963) VALETTE et HIGGINS (1967), TOMLINSON (1965) et HIGGINS (1965) ont décrit des sols ferrallitiques rouges profonds. La répartition géographique correspond à des pluviométries comprises entre 1.000 et 1.300 mm annuellement (séries de Ochanza très désaturée, de Wawa parfois profonde de 4,60 m). Ces sols correspondent cependant à des séries décrites dans le Nord Dahomey et présentés ci-après.

1.4 - Dans le Nord-Dahomey

Sous des pluviométries annuelles variant de 1.100 à 1.300 mm, en une seule saison, des sols rouges faiblement ferrallitiques ont été décrits sur grès crétaqués par WILLAIME (1965) et VIENNOT (1969). Les sols sont peu profonds, et riches en fragments gréseux altérés. Le type de matériau gréseux consolidé, dont l'altération semble cependant profonde, explique probablement ces caractères. Les sols sont donc comparables aux séries gréseuses de la région de Bobo-Dioulasso. Comme ces derniers, ils sont rajeunis par l'érosion, et leurs horizons appauvris sont peu épais. Les conditions de l'environnement sont donc toujours comparables.

1.5 - En Angola et au Mozambique

Sur la carte d'Afrique au 1/5.000.000 (D'HOORE, 1964), les sols rouges faiblement ferrallitiques ont été représentés par l'unité L1. Cette unité

est particulièrement bien représentée en Angola et au Mozambique. Les pédologues portugais ont précisé la similitude qui existait entre les sols faiblement ferrallitiques et les "solos vermelhos ferralíticos à fersialíticos" (BOTELHO DA COSTA et CASTANHO POVOAS, 1959 a et 1959 b ; BOTELHO DA COSTA, AZEVEDO, CARDOSO et RICARDO, 1959 ; BOTELHO DA COSTA et AZEVEDO, 1960, BOTELHO DA COSTA, 1961 ; BOTELHO DA COSTA et CASTANHO POVOAS, 1961).

Outre la similitude morphologique et analytique des profils, sur des roches-mères comparables aux continentaux terminaux de l'Afrique de l'Ouest, il faut signaler un point important : les profils les plus profonds sont décrits dans les régions où les pluviométries annuelles varient de 1.000 à 1.300 mm. Ce fait indique donc que ces limites pluviométriques ne correspondent pas au résultat d'influences anciennes, mais bien à celui d'une action pédogénétique actuelle ou récente. Cependant, il faut noter que des sols rouges ont été inventoriés à plus de 1.400 mm. Mais les précisions sont insuffisantes pour conclure sur la limite supérieure de pluviométrie. Il en est de même pour la Guinée Bissao, où les portugais ont décrit des sols rouges à plus de 1.400 mm (DA SILVA TEIXEIRA, 1959 et 1962).

1.6 - A Madagascar

Madagascar a souvent été appelée l'île Rouge, vue la généralisation des sols de couleur rouge, généralement profonds. Sur les grès de l'Isalo et les sables roux, les sols les plus caractéristiques qui ont été décrits sont similaires aux sols "rouges" de cette étude. (TERCINIER, 1952 ; SEGALIN, 1956 a, 1956 b, 1956 c, 1956 d, 1956 e ; MOUREAUX, 1956 ; HERVIEU, 1959, 1966 et 1967 ; VIEILLEFON, 1961, 1963 et 1964 ; VIEILLEFON et BOURGEAT, 1965 ; BATTISTINI, 1964 ; SOURDAT, 1968).

Les grès de l'Isalo forment un arc de cercle à l'ouest de Madagascar du nord au sud, et la carapace sableuse, sorte de nappe d'épandage, dont font partie les sables roux, représente des surfaces importantes dans le sud.

Les sols sur la carapace sableuse sont morphologiquement comparables aux sols "rouges". La profondeur rubéfiée peut dépasser 10 mètres, presque 15 mètres sur sables roux (HERVIEU, 1959 et 1966), l'horizon C étant défini par des grès altérés, bariolés et tendres. Les autres caractères importants de ces

sols sont l'absence assez courante d'horizon supérieur appauvri, la généralisation des phénomènes de remaniements superficiels et la présence de produits ferrugineux amorphes. Les sols associés sont des sols jaunes sur les matériaux sédimentaires remaniés des glacis néogènes (HERVIEU, 1960).

Dans ces régions, SOURDAT (1968) signale l'aptitude des grès à s'indurer quand ils se rapprochent de la surface et BATTISTINI (1964), note la fréquence d'anciennes croûtes ferrugineuses, généralement des grès violets, couvrant la série néogène. On retrouve, à nouveau, cette notion de grèsification en rapport avec des phénomènes pédologiques, mais cette fois avec l'existence de ciments surtout silicieux, et non plus seulement ferrugineux, la carapace sableuse leur devant souvent sa cohésion. Notons que la pluviométrie annuelle varie de 300 à 1.500 mm.

Outre les grès de l'Isalo, assez riches en feldspaths, sur les grès basiques de Nosy-Bé (VIEILLEFON et BOURGEAT, 1965), des sols rouges ont été décrits sous des pluviométries atteignant parfois 1.800 mm. Ils sont associés à des sols jaunes à concrétions, et présentent souvent un certain lessivage superficiel. Leur taux de saturation est parfois très faible, (les V étant inférieurs à 15 %), mais il n'est pas possible de les comparer à ceux des matériaux eux-mêmes, peut-être très désaturés. Notons que la nappe phréatique est à grande profondeur (MOUREAUX, 1956).

En définitive, les sols rouges sur sables sédimentaires de Madagascar sont comparables aux sols rouges de cette étude. Les facteurs, roches-mères et climat, ne sont pas significativement différents. Cependant, il faut remarquer la désaturation élevée de ces sols, et l'absence d'horizons appauvris. Madagascar à un relief jeune, et les sols ont généralement un excellent drainage externe, car les nappes sont très profondes. Les phénomènes d'érosion jouent un rôle important et ce sont peut-être eux qui éliminent les horizons appauvris. RIQUIER et BOURGEAT (non daté) pensent que les alternances climatiques n'ont pas modifié sensiblement la répartition des sols au Quaternaire et HERVIEU (1967) a insisté sur le fait qu'elles ont surtout joué sur l'érosion et la sédimentation, et peu sur l'altération.

Dans ces conditions, les limites climatiques prennent toute leur valeur du fait qu'elles concordent avec celles définies en Afrique Occidentale.

1.7 - Conclusions

En des régions très éloignées, de l'Afrique et de Madagascar, des sols rouges similaires aux sols de cette étude, ont été décrits sur des sables et des grès. Ces sols sont généralement en position de bon drainage, et sur les surfaces les plus anciennes. Ils sont généralement profonds, et leur profondeur maximum est toujours en rapport avec des pluviométries de 1.100 mm à 1.300 mm. Leurs taux de saturation sont très variables, mais cela n'influe pas sur leur morphologie. La liaison entre le type de roche-mère, sables et grès à kaolinites, et la pédogénèse rubéfiante est donc étroite. Les limites climatiques sont comparables à celles d'Afrique Occidentale, ce qui souligne la probabilité d'une évolution actuelle des sols.

2) Les sols différents des sols rouges

Sur les épandages de sables et de grès d'Afrique, il n'y a parfois pas de sols de type "rouge" ; même sur les surfaces considérées comme les plus anciennes. Les raisons de cette absence peuvent être multiples, en rapport avec les types de matériaux, les types de climat et de végétation, et également le facteur temps. Les classes de sols qui ont été inventoriées en position de plateau, de crête ou de sommet de pente, sont les suivantes :

- a) sols hydromorphes
- b) sols "peu évolués"
- c) sols ferrugineux tropicaux
- d) sols ferrallitiques jaunes.

Nous examinerons successivement ces différents cas.

2.1 - Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes à pseudo-gley sur grès sont assez courants au Sénégal et au Mali, dans les régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 800 mm. Généralement, c'est la présence d'un niveau gréseux, plus ou moins cuirassé par le fer, qui explique le type de développement des profils. Mais des cas de roches-mères schisteuses ont été signalés. C'est donc le mauvais drainage interne qui est le mécanisme essentiel de différenciation des sols,

dans les régions où la pluviométrie faible indique une dominance des effets érosifs.

2.2 - Les sols "peu évolués"

Il s'agit de sols peu épais à différenciation du type A (C), appelés souvent de ce fait squelettiques. Le sol est limité par un niveau de cohésion forte à faible profondeur. Le plus souvent c'est la présence de ciments siliceux (grès quartzites) qui peut expliquer la forte induration. Dans certains cas, en Haute-Volta et au Mali en particulier, l'érosion est le facteur le plus apparent d'évolution. On peut donc conclure que les sols "peu évolués" existent surtout dans les régions à pluviométrie inférieure à 1.000 mm, où le déséquilibre érosion-approfondissement est influencé par l'induration des grès.

2.3 - Les sols ferrugineux tropicaux

Les sols ferrugineux tropicaux, plus ou moins riches en concrétions, et souvent remaniés, sont les sols uniques des hauts de modelé sur certains types de grès. C'est en particulier le cas dans l'ouest de la Haute-Volta et au Mali. Ils ne présentent jamais d'étendues importantes, et ils sont associés à des sols hydromorphes et à des sols squelettiques (CHARREAU et DOMMARGUES, 1955). Les toposéquences sont caractérisées par un drainage limité, en rapport avec des grès ou des sédiments à granulométries très fines, souvent intercalés de passées schisteuses.

Cependant, sur des surfaces récentes, des sols rouges classés ferrugineux tropicaux ont été inventoriés sur grès, en particulier près de Banfora (Haute-Volta). Il s'agit de profils de couleur rouge, assez peu profonds, avec des taches à la base des horizons B, une structure peu développée, massive, et une cohésion forte ou très forte (MOREAU, 1966). A part la couleur, ils n'ont que peu de rapports avec les sols "rouges" de l'étude. Leur origine a déjà été envisagée. Il s'agirait de l'érosion, au cours du Quaternaire, de sols rouges des plateaux. La lithochromie s'est conservée dans les cas de bon drainage actuel. Par contre, la structure s'est dégradée, et il y a de fréquentes traces d'engorgement en profondeur. Tous ces cas de sols ferrugineux tropicaux correspondent à des pluviométries inférieures à 1.300 mm/an. Les facteurs qui sont en cause semblent toujours pouvoir être traduits par un drainage interne déficient.

2.4 - Les sols ferrallitiques jaunes

2.4.1 - Origine des données

Ce sont les sols qui envahissent les plateaux gréseux lorsque la pluviométrie dépasse 2.000 mm. Ces sols sont très répandus et les cas les plus typiques relevés dans la bibliographie se rapportent aux études suivantes :

- sur les sables tertiaires de Basse Côte d'Ivoire : BERLIER, DABIN et LENEUF, 1956 ; DABIN, 1959 ; DABIN, LENEUF et RIOU, 1960 ; PERRAUD et CHEROUX, 1963 ; LENEUF et RIOU, 1963 ; HUMBEL, 1963 et 1964 ; DABIN, 1964 ; ROOSE et CHEROUX, 1966 ;
- sur les grès de Carnot et de Ouadda, en République Centre Africaine : BENOIT-JANIN, 1960 ; QUANTIN, 1963 et 1965 ;
- sur les grès des plateaux Bateke au Congo-Brazzaville : BOCQUIER, 1958 a et 1958 b ; DE BOISSEZON, 1961, 1963 et 1965 ; BRUGIERE, 1960 ;
- sur les sables et grès du Crétacé et du Quaternaire au Cameroun : BACHELIER, 1959 ; MARTIN et SIEFFERMANN, 1966 ; COMBEAU, 1954 ;

2.4.2 - Les sols et leur environnement

Les caractères communs à tous ces sols sont les suivants :

- grande profondeur des profils ;
- très faible différenciation en horizons ;
- augmentation très progressive des teneurs en argile vers la profondeur, ce qui indiquerait des épaisseurs appauvries élevées ;
- couleur jaune, ou ocre ;
- très forte désaturation, le rapport S/T étant inférieur à 20 % ;
- valeurs faibles des rapports fer/argile granulométrique ;
- enfin, kaolinite dominante, et faibles quantités de gibbsite.

Lorsque la pluviométrie atteint 3.600 mm (par exemple sur sables tertiaires au Cameroun), les profils sont homogènes sur plus de 15 mètres (COMBEAU, 1954). La question de la profondeur réelle du sol se pose, ainsi

que celle de sa limite avec le matériau. Mais même dans ce cas, il n'y a cependant pas, ou pratiquement pas, de gibbsite (alumine libre).

Le phénomène des dépressions fermées, signalé dans le cas des terres de barre (Dahomey), a été évoqué plusieurs fois. Il a été décrit en particulier en Côte d'Ivoire et au Congo. HUMBEL, (1964) a précisé l'importance géographique de ces dépressions sur les sables tertiaires de Basse Côte-d'Ivoire. Sous ces dépressions existent des lentilles argileuses, contenant plus de 35 % d'argile, alors que les sols n'en contiennent guère plus de 20 %, sauf sur certaines pentes fortes (ROOSE et CHEROUX, 1966). Il n'est pas possible de dire si ces niveaux argileux sont d'origine pédologique ou sédimentaire. L'éventualité de chenaux de circulation des nappes en profondeur est plausible, en relation avec l'hétérogénéité des sédiments. Dans ces conditions, le phénomène de dépression traduit un soutirage au vide important et l'entraînement en profondeur d'argile, de fer et de silice pourrait être invoqué pour expliquer les pertes de substance. Dans cette optique, DABIN (1964) envisage le départ de quantités importantes de silice en rapport avec des abaissements successifs de nappe. Un rapprochement peut donc être établi avec le phénomène des dépressions dans certaines zones à sol "rouge".

2.4.3 - Les mécanismes de la différenciation

La gamme des sols ferrallitiques jaunes sur grès est vaste, et pourtant tous ces sols ont des caractères communs nombreux. Dans toutes les régions considérées, la pluviométrie est élevée. Le bilan drainage-évapotranspiration doit se traduire par des percolations importantes. De plus, il y a probablement des excès temporaires d'eau dans les profils, malgré un bon drainage interne. Ce régime hydrique particulier des sols conduit à une désaturation par lixiviation intense des bases. Le fer serait également entraîné profondément, car ses quantités sont faibles par rapport à celles d'argile. Les pH bas des sols (4,5 à 5,0), l'état humide toute l'année, la richesse relative en acides fulviques expliquent probablement le passage du fer à l'état réduit. La migration se fait à longue distance, parfois jusqu'aux cuirasses de bas de pente. Dans certains cas, l'accumulation est à plus de 7 mètres de profondeur (BERLIER, DABIN et LENEUF, 1956).

De ce qui précède, il apparaît que la perte de rubéfaction, ou la non rubéfaction, serait due à un excès d'eau, et surtout à l'état humide toute l'année des profils. Dans ces conditions on peut se demander si la rubéfaction des sols rouges sur grès n'est pas liée à une alternance climatique : saison des pluies - saison sèche. Les sols "rouges" sont en effet surtout situés dans les régions tropicales, ou dans des régions à climat sub-équatorial, mais à total pluviométrique peu élevé. Mais il ne faut pas exclure le rôle possible des acides fulviques dans la non-rubéfaction. Ces acides organiques sont en effet importants en valeur relative dans les régions équatoriales et leur migration vers la profondeur est souvent notée, au Gabon par exemple. Rappelons que le rapport acides fulviques/acides humiques dans l'horizon superficiel est inférieur à 1,0, dans le cas des sols "rouges" sur grès.

C - LES SOLS, DEVELOPPES SUR MATERIAUX VARIES, MAIS "SIMILAIRES" AUX SOLS ROUGES

1) Généralités

Des sols d'aspect similaire aux sols "rouges" ont été décrits sur des roches très différentes des sables et des grès. Leur étude nous apporte un certain nombre d'enseignements.

Ces sols sont tous classés en ferrallitiques. Les caractères communs avec les sols rouges sont les suivants :

- grande profondeur des profils
- horizon B, épais, rouge et homogène
- texture sablo-argileuse à argileuse
- horizons supérieurs appauvris
- kaolinite exclusive.

Les caractères suivants sont cependant moins constants :

- absence de concrétions
- présence de pseudo-sables
- gibbsite absente ou en faibles quantités
- rapports SiO_2/Al_2O_3 compris entre 1,7 et 2,1

De tels sols ont été décrits sur des gneiss, des basaltes, des gabbros, des amphibolites, des micaschistes. Seuls quelques exemples sont présentés ci-après.

2) Les sols rouges sur roches cristallines acides

2.1 - Les faits

Les roches envisagées sont essentiellement des granites, gneiss, migmatites. Les profils BF 80 de Bouaffle en Côte d'Ivoire, (RICHE, 1967), NGB 30 du Cameroun (MARTIN, 1966 a), YB 25 et YB 73 sur gneiss en R.C.A. (BOULVERT, 1966), présentent des horizons B rouges "diagnostiques" épais. Ces sols sont situés en haut de pente, et de nombreux caractères morphologiques et analytiques sont similaires à ceux des sols rouges sur grès. En particulier, la présence de pseudo-sables (micropolyèdres) est toujours signalée.

Des différences apparaissent cependant, Elles sont les suivantes :

- Les taux d'argile peuvent souvent dépasser 60 %
- Les teneurs en fer sont élevées, et la moyenne des déterminations est significativement supérieure à celle des différents sols rouges sur grès. En effet, des chiffres de 5 à 8 % sont courants pour le fer triacide.
- Les rapports $SiO_2/\Delta l_2O_3$ sont inférieurs à 2,0. Ils sont supérieurs à 1,6 en Afrique Occidentale, cependant dans certains pays, en Guyane, mais surtout à Madagascar, ils peuvent être de l'ordre de 1,0 (MOUREAUX, 1956). Ce fait suggère la présence d'alumine libre, non combinée sous forme de kaolinite.
- Une tendance à l'apparition de taches et de concrétions apparaît à la base de nombreux horizons B. Cette tendance est très générale en Afrique Occidentale, alors qu'en Guyane et à Madagascar, elle est limitée et semble même décroître quand le total pluviométrique croît. Elle est souvent nettement plus développée sous savane que sous forêt (QUANTIN, 1965). Ce même phénomène a été noté pour des sols sur grès, mais dans ce cas le concrétionnement est toujours associé à une décoloration de l'ensemble de la matrice.

- Quand les profils ont été approfondis suffisamment, on s'aperçoit souvent qu'ils présentent des indices de remaniement. Plus exactement, ils se sont développés sur des matériaux de recouvrement, parfois très épais, équivalents de ce que nous proposons d'appeler des "microcontinentaux" (exemple NGB 30 du Cameroun avec un niveau de gravillons à 750 cm).
- Les profils les mieux caractérisés sont souvent situés en haut de pente, la toposéquence rouge-beige étant classique, sinon sous tous les climats, du moins dans le cas du continent africain. Plusieurs auteurs ont étudié récemment cette question, en particulier QUANTIN (1965), BOULVERT (1968) et CHATELIN (1969 a). Ce dernier chercheur conclut que les sols rouges ont un pédoclimat particulier, avec forte lixiviation des bases et de la silice, et faible exportation de fer.
- Enfin, de nombreux auteurs ont noté que l'intensité de la rubéfaction augmente en profondeur (HERVIEU, 1960 ; DABIN, 1964 ; MARTIN et SEGALEN, 1966 ; MARTIN, 1966 a ; LEVEQUE, 1967). Dans certains cas, la couleur passe progressivement de la planche 2,5 YR à celle des 10 R. Pour le profil NGB 30 sur granite, elle est de 5 YR 5/6 de 40 à 330 cm, de 2,5 YR 5/6 ensuite pour atteindre 10 R 4/8 à 500 cm. Dans d'autres cas, les auteurs ont défini des sols "jaunes sur rouges" (en Côte d'Ivoire et à Madagascar), sans toujours préciser l'importance et le niveau des remaniements et des recouvrements, pourtant certains (SEGALEN, 1967 b).

2.2 - Les interprétations

Tous les sols qui précèdent n'existent que sous des climats, actuellement assez à très humides. Les pluviométries varient de 1.300 à 4.000 mm, mais les profils rouges sont particulièrement fréquents entre les isohyètes 1.800 et 2.500 mm. Sous de tels climats, les sols rouges sur grès ne semblent pas exister, ou du moins se raréfient.

La séquence de couleur rouge en sommet de pente, beige ou jaune en milieu et bas de pente est générale, quelle que soit la roche ou la pluviométrie. Cette séquence ne semble pas pouvoir être expliquée dans tous les cas par une différence d'âge des surfaces géomorphologiques. Il est donc probable que la succession de sols rouges et de sols jaunes représente souvent deux

types de pédogénèses actuelles. Ces deux pédogénèses ne sont pas indépendantes et la liaison des sols entre eux est d'ordre génétique (BOCQUIER et CLAISSE, 1963). En particulier, les éclaircissements de couleur qui sont notés dans les sols de transition des sols rouges aux sols beiges ou jaunes, débutent toujours dans les horizons de surface. Cette remarque concorde avec la conclusion sur l'acquisition de la couleur rouge dans les horizons profonds des sols. Il est donc probable, conclusion à laquelle nous étions arrivés pour les sols sur grès, que l'acquisition de la rubéfaction est un phénomène pédogénétique et non climatique.

Enfin, les roches granitiques contiennent toujours du quartz. Ce dernier élément est souvent de l'ordre de 20 % du poids du matériau originel alors qu'il dépasse 50 % sur les grès. Mais la présence d'une certaine quantité de quartz est un fait important. C'est même le seul point commun qui existe entre les roches granitiques et les grès, et son rôle pédogénétique est donc probable. Par contre, les teneurs en fer des sols sur granites sont plus élevées que sur grès. Dans ce domaine, le dépouillement d'un certain nombre de données nous a indiqué que plus les sols rouges étaient pauvres en quartz, plus les taux de fer étaient élevés en valeur absolue. Une relation entre ces deux faits est donc plausible.

3) Les sols rouges sur basaltes

Deux catégories de sols peuvent être désignées :

- les sols rouges fersiallitiques
- les sols rouges ferrallitiques

Les premiers, souvent appelés "rouges tropicaux" (MARTIN, SIEFFERMANN et VALLERIE, 1966) sont essentiellement caractérisés par la présence, en quantités variables, d'argile 2/1, par des profils relativement peu épais, avec une bonne structure d'ensemble et une tendance à l'individualisation du fer en profondeur. Ces éléments suffisent à les séparer, au point de vue classification, des sols "rouges".

Les sols ferrallitiques rouges sur basaltes ont été étudiés par de nombreux auteurs, et des profils morphologiquement comparables aux sols de

cette étude ont été cités à Madagascar et en Guyane (SEGALEN, 1956 c, 1956 d, et 1957 ; VIEILLEFON et BOURGEAT, 1965 ; BOURGEAT, HERVIEU et RIQUIER, 1956 ; VIEILLEFON, 1963 ; LAPLANTE et BACHELIER, 1953 ; MARTIN et SEGALEN, 1964 ; LEVEQUE, 1967).

La plupart des auteurs insistent sur la grande épaisseur des profils sur basaltes anciens, très souvent de plus de 10 mètres, homogènes, sans concrétions, avec une grande perméabilité (LAPLANTE, 1954). Les teneurs en argile varient de 40 à 70 %, sans lessivage net et les taux de saturation sont souvent inférieurs à 10 %. Cependant les rapports SiO_2/Al_2O_3 sont très variables, mais parfois inférieurs à 1,0.

De nombreux chercheurs, en particulier au Cameroun et à Madagascar, ont insisté sur la richesse en fer, 20 - 25 %, en comparaison de teneurs en quartz faibles, 18 à 22 %. Les rapports fer/argile sont alors nettement supérieurs à 0,20, sans aucun ou avec peu de concrétionnement. Ces sols, très homogènes, sont souvent comparés aux krasnozems. Il est intéressant de noter que leur teneur en limon granulométrique est souvent élevée, sans que l'on puisse savoir la part, dans cette répartition, d'éventuels "pseudo-limons" résistants à la dégradation. Ces derniers sont cependant signalés au Cameroun (LAPLANTE et BACHELIER, 1953). En Guyane, LEVEQUE (1967) précise que la fraction limon contient beaucoup d'hydroxydes.

Au Cameroun, SIEFFERMANN (1969) a étudié les caractères des sols sur basaltes anciens du plateau de l'Adamaoua (pluviométrie 1.500 à 1.600 mm). Il note le fait que les vrais sables sont rares, et que les micro-concrétions contiennent une partie importante des minéraux argileux. La fraction granulométrique argileuse, qui semble présente dans l'horizon C en même quantité qu'en B, contient elle-même de 15 à 20 % de fer triacide, dont une proportion très importante est à l'état amorphe. De plus, de l'alumine s'est individualisée (jusque 17 % parfois).

En Côte d'Ivoire, des sols moins épais se développent également sur des matériaux riches en minéraux ferro-magnésiens, gabbros, dolérites, (LENEUF et RIOU, 1963). Ils semblent être moins dominants quand la pluviométrie dépasse 1.600 mm, sauf quand ils sont protégés par une cuirasse.

La convergence morphologique des sols ferrallitiques rouges sur grès et sur basaltes repose donc sur des caractères communs, en particulier sur la rubéfaction et la création de pseudo-particules. Mais elle présente aussi plusieurs différences importantes, dont la présence d'alumine libre. On peut rapprocher ce fait des très faibles quantités de silice non combinée (quartz), qui existent dans les matériaux. Cette alumine libre, sous forme de gibbsite, augmente vers le haut des profils. Sa présence caractérise un stade plus avancé d'évolution par dégradation de la kaolinite, stade qui ne serait pas atteint dans le cas des sols sur matériaux gréseux, probablement du fait de la richesse en silice non combinée. Le rôle de cette dernière (quartz) ne peut être expliqué que par une libération suffisante de silice en solution, permettant à l'alumine de se recombinaison pour reformer de la kaolinite. Quand les teneurs en quartz sont insuffisantes cette recombinaison ne se ferait pas. Nous retiendrons cette conclusion comme hypothèse de travail.

4) Conclusions

L'étude critique des données concernant les sols rouges similaires aux sols rouges sur grès, bien que développés sur des roches diverses, a mis en évidence les points suivants :

- la richesse en quartz des roches-mères est un caractère important. Quand les teneurs en quartz des horizons B descendent en dessous d'un certain seuil, la gibbsitisation apparaît brusquement.
- la généralisation de la toposéquence rouge à beige ou jaune indique que son origine est d'abord pédogénétique, même dans le cas des sols sur sables et grès.

D - CONCLUSIONS SUR LES AUTRES SOLS SUR SABLES ET GRES

Des profils comparables à ceux des sols "rouges" sur roches-mères sableuses et gréseuses, ont été décrits sur des roches variées, éruptives ou métamorphiques, et sous une gamme de climats étendue. En fait, les matériaux originels sont toujours des produits d'altération de ces roches, dans la mesure

où ces dernières libèrent des silicates d'alumine 1/1 et des hydroxydes de fer. Cela explique que les continentaux terminaux, considérés généralement comme l'épandage des produits par érosion de sols ferrallitiques, sont des roches-mères équivalentes aux matériaux d'altération profondément ferrallitisés, en place ou remaniés. Quand aux grès, d'âge variés du primaire au tertiaire, ce sont des matériaux d'origine continentale ou marine. Mais dans leur état actuel, ils ne diffèrent guère des sables argileux continentaux. Dans les deux origines, grèsification et argilification peuvent être interprétées comme le résultat des successions de pédogénèse, de morphogénèse et d'actions de nappes, qui se sont succédées depuis la mise en place des sédiments.

Cependant, sur le plan analytique, des différences apparaissent pour les différentes catégories de sols rubéfiés sur matériaux divers. Mais il est remarquable que ces différences sont essentiellement en rapport avec les teneurs en silice non combinée (quartz) des matériaux. Deux conclusions peuvent être déduites de ce rapprochement :

1) Quand la teneur en quartz des roches-mères est en dessous d'un certain seuil, il apparaît des quantités croissantes de gibbsite. Le seuil semble dépendre du total pluviométrique. Cette apparition d'alumine libre vers le haut des profils indique que la kaolinite se dégrade. Il y aurait donc enrichissement relatif en alumine par départ préférentiel de la silice. Dans le cas des sols riches en quartz, comme sur les sables et les grès, il y a par contre, stabilité relative, et faible différenciation d'alumine. C'est cet état qu'exprime la généralisation des rapports SiO_2/Al_2O_3 de 1,7 à 2,1. Il en serait de même pour tous les matériaux qui auraient suffisamment de quartz de par leur origine, c'est-à-dire la plupart des roches éruptives acides, de leurs altérations, et des produits plus ou moins transportés qui peuvent en résulter.

2) Quand la pluviométrie croît, les sols "rouges" équivalents, morphologiquement et analytiquement à ceux de l'étude, ont des taux d'argile et surtout de fer de plus en plus élevés. De même, allant du Sahara à l'équateur, les profils de sols à horizon B rubéfié (2,5 YR et 10 R), quel que soit leur classement (subaride, ferrugineux tropicaux, ferrallitiques) ont des textures de plus en plus argileuses. Ils sont aussi de plus en plus riches en fer

par rapport à l'argile au fur et à mesure que la pluviométrie croît. On a l'impression que la création, et la stabilité de la rubéfaction résulteraient d'équilibres privilégiés, des taux d'argile et des taux de fer, à des niveaux différents. Pour chaque domaine climatique, la relation fer/argile, en valeur absolue et en valeur relative, pourrait en être la formulation.

En définitive, il nous semble nécessaire, pour définir la pédogénèse des sols "rouges" d'approfondir deux questions :

- le rôle du quartz, et de la silice
- l'origine et l'évolution de la liaison fer/argile.

CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE

La caractérisation des sols rouges

La similitude morphologique des sols rouges faiblement ferralitiques sur sables et sur grès, a été confirmée, et précisée, par l'étude comparative des sols du Sénégal, du Dahomey, et de Haute-Volta. Cette similitude peut se schématiser par la succession d'horizons appauvris en argile et en fer, et d'horizons B rubéfiés, épais et à pseudo-sables.

La comparaison avec d'autres sols

La comparaison avec d'autres sols, qu'ils soient rouges ou non, qu'ils soient développés sur des grès ou non, a permis de préciser l'importance relative des facteurs de formation. Cette comparaison a montré que les sols rouges non concrétionnés ne gardaient leur équilibre que sous certaines conditions. En allant du Sahara vers l'équateur, les sols qui présentent une rubéfaction intense sont de plus en plus riches en argile dans les horizons B au fur et à mesure qu'on se trouve sous des climats de plus en plus humides. Il semble que le rapport fer/argile croisse également avec la pluviosité. Il en résulte que la concentration relative en fer des profils augmente progressivement.

Mais dans le cas des sols sur grès, il est remarquable que le niveau d'équilibre fer/argile atteigne un maximum pour une teneur en argile de l'ordre de 50 à 55 %.

Les facteurs de la pédogénèse

L'étude des facteurs de formation des sols rouges, et les enseignements tirés de l'examen des autres types de sols, fournissent les conclusions suivantes :

- Le climat est un facteur déterminant. Les sols ne sont en équilibre apparent avec leur environnement qu'entre les isohyètes 1.200 et 1.800 mm. En-dessous de l'isoyète 1.000 mm, les observations font penser que des superficies importantes de sols rouges ont existé, puis ont disparu au cours du Quaternaire. Au-dessus de 2.000 mm, les conditions climatiques sont défa-

vorables à la conservation de la rubéfaction, lorsque les roches-mères contiennent abondamment du quartz. Cette conservation de la rubéfaction semble cependant facilitée par l'alternance de saisons sèches et humides bien marquées.

- La position des sols sur les modelés est un facteur également très important. La toposéquence de sols rouges et de sols de couleur claire est générale sur toutes les roches contenant une certaine proportion de quartz. Cette succession est d'origine pédogénétique, ce qui indique que l'évolution des sols rouges influe peut-être sur celle des sols associés dans les toposéquences.

- Les facteurs végétation et actions biologiques peuvent provoquer un changement d'orientation de la pédogénèse lorsque les sols sont en déséquilibre dans des régions relativement sèches.

- Un facteur temps enfin, est à envisager. On a tout lieu de penser que certains caractères sont hérités. Cependant, l'étude comparative des sols a fourni de nombreux arguments pour conclure à l'actualité de l'évolution des profils situés actuellement entre 1.200 et 1.800 mm de pluviométrie annuelle.

Les processus de la pédogénèse

La différenciation en horizons des sols rouges sous l'interaction des facteurs précédents, se réalise en fait par trois processus :

- un phénomène de rubéfaction
- une différenciation texturale par rapport aux matériaux
- un phénomène d'appauvrissement par rapport aux horizons B

La rubéfaction est un caractère qui n'est pas spécifique aux sols rouges sur grès, mais qui s'avère avoir une origine pédogénétique. Sa création, et sa conservation, dépendent de la présence d'hydroxydes de fer, de certaines conditions de drainage en milieu ouvert mais aussi du type de liaison avec les surfaces argileuses.

La différenciation texturale se réalise par une augmentation relative des teneurs en argile granulométrique des horizons B par rapport aux horizons C et aux roches-mères. Nous appellerons ce phénomène argilification.

L'appauvrissement est un phénomène morphologique qui affecte tous les horizons supérieurs, et se traduit par une diminution des teneurs en argile et en fer par rapport à celles du quartz.

Quelle que soit la texture sableuse, argileuse ou gréseuse des roches-mères, ces processus conduisent à la formation de profils très comparables entre eux. L'analyse des étapes successives de la transformation en sol de ces différentes roches-mères, devrait donc nous permettre de définir les mécanismes de la pédogénèse. Ce sera l'objet de la seconde partie.

A N N E X E S
D E L A
P R E M I E R E P A R T I E

TABLEAU N° A 3PROFIL CA 1 DE CASAMANCE: Description -

0 - 15 cm:	Horizon gris-brun - sableux - peu structuré - à tendance grumeleuse. Porosité faible - assez friable - transitions assez brusques.
15 - 33 cm:	Horizon brun-rosé - sableux - peu structuré à débit polyédrique. Porosité moyenne surtout tubulaire - très bon enracinement.
33 - 42 cm:	Horizon analogue - un peu plus brun.
42 - 75 cm:	Horizon brun-rouge-brique - sablo-argileux, à argilo-sableux présentant des pseudo-sables - structure peu nette à débit polyédrique - moyenne à fine. Porosité assez bonne surtout tubulaire - Cohésion moyenne à forte. Très bon enracinement. Horizon très travaillé par la faune.
75 - 105 cm:	Passage progressif à un horizon rouge-brique - sablo-argileux à argilo-sableux. Un peu structuré - à tendance polyédrique. Assez bonne porosité - cohésion moyenne. Quartz émoussés ou arrondis.
105 - 400 cm:	Passage assez net en fonction des variations de cohésion à un horizon rouge-brique - sablo-argileux - faiblement structuré à tendance polyédrique. Bonne porosité - Cohésion faible - assez friable - bon enracinement. à 3 mètres semble plus friable - à 3,50 mètres traces de racines encore visibles.
400 cm:	Début d'individualisation d'éléments beige à blanc - très petits dans une masse rouge-brique - de texture argilo-sableuse - très poreux - Limite assez nette des éléments blanchâtres ou blanc beige - le tout passe progressivement à une masse rouge-brique à éléments blanc-gris à blanc-beige de texture argilo-sableuse - assez friable en sec.
435 cm:	La ségrégation du fer devient plus nette - brusque augmentation de la teneur en argile.
490 cm:	Les taches blanchâtres assez bien délimitées dans la masse de l'horizon rouge-brique contiennent des plages ocres.
535 cm:	Les plages blanchâtres et ocres deviennent encore plus abondantes - texture argilo-sableuse - mais moins argileuse apparemment qu'à 435 cm. La porosité tubulaire est toujours élevée. Encore des racines à cette profondeur.

TABLEAU N° A 4 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL CA 1 -

TYPE DE SOL: Sol Rouge Ferrallitique (Série des Bayottes)

N° Echantillon	10	11	12	13	14	15	16
Profondeur en cm.	0 - 4	4-16	16-28	28-42	60-75	100-110	150-160
Humidité %	0.6	0.5	0.5	0.5	0.8	0.9	0.5

ANALYSE MECANIQUE

Argile %	6.5	7.0	8.5	17.0	34.0	32.0	25.5
Limon fin %	1.8	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	0.5
Sable fin %	66.0	52.7	55.6	49.1	38.6	39.0	44.3
Sable grossier %	23.4	36.9	32.6	30.7	23.7	24.7	29.0

MATIERES ORGANIQUES

Mat. org. totale %	1.66	0.90	0.76	0.66	0.38	0.41	0.22
Carbone %	9.6	5.2	4.4	3.8	2.2	2.4	1.3
Azote %	0.86	0.49	0.41	0.36	0.32	0.25	0.21
C/N	11.2	10.6	10.7	10.6	6.9	9.6	6.2

F E F

Fe ₂ O ₃ libre %	7.3	7.0	7.7	12.1	18.9	17.3	16.0
Fe ₂ O ₃ total %	9.6	9.3	9.8	14.6	25.4	22.8	21.1
Fer libre/Fer total	76	75	79	83	74	76	76

ANALYSE TRIACIDE

Perte au feu	3.10	2.25	-	3.15	4.9	4.61	3.95
Résidu	88.4	89.0	-	80.4	65.7	66.8	69.6
Silice	3.9	4.0	-	7.5	13.7	13.4	11.9
Alumine	3.75	3.8	-	6.5	12.7	12.3	10.4
Fer	0.90	0.85	1.00	1.6	2.95	2.50	2.75

BASES ECHANGEABLES mé POUR 100 g de SOL

Calcium	3.40	2.38	1.93	1.43	1.07	0.84	0.83
Magnésium	1.46	0.66	0.69	0.70	0.65	0.81	0.90
Potassium	0.19	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03
Sodium	0.16	0.15	0.11	0.07	0.07	0.16	0.08
S.	5.21	3.26	2.79	2.25	1.84	1.84	1.84
T.	5.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	4.0
S/T = V	90	86	72	58	47	47	46

ACIDITE ALCALINITE

pH eau	6.4	6.0	5.7	5.5	4.9	4.9	5.0
pH Chlorure de K.	5.6	5.1	4.8	4.3	3.9	3.9	4.0

SOLUTION DU SOL

Conductivité mmhos	0.040	0.025	0.024	0.024	0.024	0.031	0.020
Extrait sec. mg/100 g...	32	20	19	19	19	25	16

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

pF 3	7.1	6.9	6.0	8.4	15.3	13.9	14.1
pF 4,2	4.1	3.5	3.8	6.1			9.4
Eau utile %	3.0	3.4	2.2	2.3	14.2	12.9	4.7
Instabilité struc. Is. .	0.27	0.17	0.45	0.86	1.65	1.36	1.67

TYPE DE SOL: Sol Rouge Ferrallitique (Série des Bayottes)

N° Echantillon	17	18	19	19a	19b	19c	19d
Profondeur en cm.	200-210	250-260	300-310	412-435	480-500	530-550	570-600
Humidité %	0.5	0.5	0.6	0.3	0.3	0.8	0.8

ANALYSE MECANIQUE

Argile %	26.7	27.5	28.7	36.5	38.3	35.5	36.7
Limon fin %	5.0	5.7	6.5	1.5	2.2	9.7	7.2
Sable fin %	40.4	44.2	44.9	44.2	44.8	40.3	41.9
Sable grossier %	27.2	21.9	19.1	17.3	14.2	13.4	12.4

MATIERES ORGANIQUES

Mat. organique totale %	0.24	0.24	0.24	0.17	0.16	0.17	0.22
Carbone %	1.4	1.4	1.4	1.0	0.9	1.0	1.3
Azote %	0.19	0.18	0.19	0.17	0.18	0.18	0.19
C/N	7.4	7.8	7.4	5.9	5.0	5.5	6.8

F E R

Fe ₂ O ₃ libre %	17.6	17.6	18.5	20.8	24.0	23.0	24.3
Fe ₂ O ₃ total %	21.6	21.8	23.0	26.9	30.2	31.7	32.1
Fer libre/Fer total	81	81	80	77	79	73	76

ANALYSES TRIACIDES %

Perte au feu	4.5	4.5	4.5	5.0	5.1	5.3	5.4
Résidus	67.0	67.5	66.0	66.2	62.1	59.3	54.7
Silice	13.9	13.1	13.9	15.2	15.0	16.9	20.6
Alumine	11.4	11.9	12.8	14.0	13.6	14.5	14.8
Fer	2.40	2.60	2.60	3.50	3.35	3.25	3.50

BASES ECHANGEABLES mé POUR 100 grs DE SOL

Calcium	0.91	1.14	1.34	1.48	1.73	1.55	1.52
Magnésium	0.96	1.00	0.96	1.11	1.44	1.16	1.00
Potassium	0.07	0.06	0.10	Tr.	Tr.	Tr.	Tr.
Sodium	0.10	0.13	0.20	Tr.	Tr.	Tr.	Tr.
S.	2.04	2.33	2.60	2.59	3.17	2.71	2.52
T.	4.3	4.5	4.7	3.7	5.4	5.1	5.3
S/T = V	47	52	55	70	59	53	48

ACIDITE ALCALINITE

pH eau	5.1	4.9	5.0	5.4	5.5	5.5	5.3
pH Chlorure de K.	4.0	4.3	4.0	4.1	4.1	4.1	4.0

SOLUTION DU SOL

Conductivité mmhos	0.027	0.031	0.035	0.022	0.025	0.025	0.027
Extrait sec mg/100 g ...	22	25	28	18	20	20	22

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

pF 3	15.0	15.3	15.8				
pF 4,2	9.7	9.8	10.1				
Eau utile %	5.3	5.5	5.7				
Instabilité struc. Is. .	2.12	1.91	2.44	2.31	2.68		
Perméabilité Kcm/h.....				3.7	2.8	6.5	3.0

Profil CC 68 de Haute-Casamance: Description

TYPE DE SOL: Faiblement Ferrallitique Rouge

Mission/Dossier: Haute-Casamance

Observateur: TURENNE

Date d'observation: 1963/

Localisation: Lieu: Route de Kideli Dimbel à Toutoune
A environ 13 km Est de Kideli-DimbelSituation: Géomorphologie: Petit plateau, sommet de deux versants en pente douce
au-dessus de la cuirasse.

Matériau originel: Sables argileux du Continental terminal

Végétation:Composition floristique par strates: Forêt claire à base de Terminalia, Combretum:
Cassia siberiana, sous-bois herbacé à Andropogons
de 2 à 3 mètres de haut.Description du profil:

0 - 11 cm:	Horizon supérieur gris-brun - sable fin - structure grumeleuse mal définie - débit particulaire - nombreux petits quartz roses - moyennement poreux - assez compact - cohérent - friable - transition diffuse à:
11 - 26 cm:	Horizon gris-brun - rouge à la partie supérieure à nettement rouge vers le bas. Sableux à sable grossier - très légèrement argileux - structure fondue à débit polyédrique - massif assez compact - peu friable - bon enracinement - nombreux quartz grossiers. Porosité tubulaire - transition assez nette à:
26 - 53 cm:	Horizon rouge-brun à rouge - argilo-sableux fin - fraction d'éléments fins peu importante - structure fondue à débit moyennement polyédrique, peu friable, cohérent - peu poreux - Transition assez nette à:
53 - 88 cm:	Horizon rouge brique à rouge-brun - argilo-sablo-limoneux - Structure fondue à débit polyédrique mal définie à particulaire - assez compact, assez cohérent - assez friable - transition très diffuse (compacité différente) à:
88 - 110 cm:	Matériau rouge un peu moins argileux que le précédent mais plus tassé - plus compact - structure fondue à débit polyédrique, peu friable - cohérent - peu poreux.
110 - 200 cm:	Horizon rouge à rouge-brun - argilo-sableux, moins argileux au toucher que les précédents.

TABLEAU N° A 7 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL CC 68 -

TYPE DE SOL: Faiblement Ferrallitique Rouge de Haute-Casamance -

N° Echantillon	680	681	682	683	684	685
Profondeur	0 - 10	30-45	60-80	90-100	120-160	180-200
Humidité %	0.8	0.6	1.2	1.2	1.3	1.5

ANALYSE MECANIQUE

Argile %	8.0	24.0	36.0	42.5	42.5	51.0
Limon %	3.0	6.0	5.8	4.5	6.3	6.8
Sable fin %	42.5	28.9	28.1	26.9	28.2	33.2
Sable grossier %	44.5	39.8	28.0	24.5	21.4	17.2

MATIERES ORGANIQUES EN 10⁻³

Mat. org. totale %	1.21	0.66	0.43	0.31	0.31	0.33
Carbone %	7.0	3.8	2.5	1.8	1.8	1.9
Azote %	0.41	0.33	0.19	0.30	0.28	0.26
C/N	17.1	11.5	8.6	8.3	6.4	7.3

F F D

Fe ₂ O ₃ libre %	4.5	9.9	12.3	14.1	20.4	23.1
Fe ₂ O ₃ total %	5.7	11.1	14.6	17.1	22.5	23.1
Fer libre/Fer total	78	89	88	84	91	

BASES ECHANGEABLE mé POUR 100 grs DE SOL

Calcium	2.67	0.91	0.40	0.43	0.66	1.36
Magnésium	0.42	0.74	0.67	0.87	0.99	0.88
Potassium	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02
Sodium	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
S.	3.15	1.70	1.10	1.35	1.70	2.25
T.	3.50	2.0	2.75	2.90	3.25	3.80
S/T = V %	90	85	40	47	52	59

ACIDITE ALCALINITE

pH eau	6.1	4.9	5.0	5.0	5.1	5.3
pH Chlorure de K.	4.0	5.0	4.0	4.1	4.1	4.2

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Porosité %	42.8	38.3	40.3			
pF 3	3.6	9.3				
Eau utile %	1.9	2.1				
Instabilité struc. Is	0.38	1.10				
Perméabilité Kcm/h	3.9	5.9	5.5			

TABLEAU N° A 8

Profil NR 2 du Sénégal: Description

Situation géographique:: Route de Kaolack - à Nioro-Du-Rip - au P.K. 44,5 - à 30 m à droite de la route juste avant le village de Darou N'Demène.

Topographie : Butte aplatie - cuirasse au Km 41 puis sol rouge jusqu'au km 45.

Végétation: Composition floristique par strates: Bauhinia reticulata - Guiera sénégalensis - Aeragrostis - champs de mil - Lptadenia lancifolia - combretacés.

Description du profil: (Schématique)

0 - 25 cm :	Horizon beige gris humifère - sableux - nombreux sables grossiers - structure fondue - peu friable, compact - débit polyédrique.
25 - 40 cm :	Horizon rouge-beige - sablo-argileux - structure fondue - à débit polyédrique - porosité moyenne - très sec - compact - dur.
40 - 340 cm :	Horizon rouge 2,5 YR 4/8 sablo-argileux - très uniforme - structure à débit polyédrique - peu développée - friable - présence de racines jusqu'à 2,60 m. Cohésion d'ensemble moyenne à forte - porosité faible - (tubulaire) - compacité moyenne - Nombreux quartz grossiers hyalins - les petits sont ferrugineux.
340 - 460 cm :	Sondages : couleur rouge homogène.
PRELEVEMENTS	
21: 0 - 10	24: 100 - 120
22: 10 - 20	25: 220 - 310
23: 40 - 60	26: 440 - 460

TABLEAU N° A 9 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL NR 2

TYPE DE SOL: ROUGE DE NIORO-DU-RIP

N° Echantillon	21	22	23	24	25	26
Profondeur en cm.	0 - 10	10-20	40-60	100-120	220-310	440-460
Humidité %	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3

ANALYSE MECANIQUE

Argile %	4.5	6.5	8.7	18.2	19.2	19.5
Limon fin %	1.0	0.7	5.2	3.5	3.5	3.0
Sable fin %	62.0	61.0	56.0	51.6	47.9	50.0
Sable grossier %	29.1	28.5	26.5	27.2	27.6	24.1

MATIERES ORGANIQUES

Mat. org. totale %	0.76	0.78	0.29	0.25	0.31	0.18
Carbone %	4.4	4.5	1.7	1.5	1.8	1.1
Azote %	0.30	0.31	0.16	0.20	0.17	0.14
C/N	14.7	14.5	10.6	7.5	10.6	7.8

F E R

Fe ₂ O ₃ libre %	0.77	0.23	1.0	1.5	1.7	1.7
Fe ₂ O ₃ total %	1.05	1.24	1.3	2.0	2.2	2.2
Fer libre/Fer total % ...	73	75	80	76	78	78

ANALYSE TRIACIDE

Fer triacide %	9.5	1.15	1.40	2.30	2.25	2.20
Si	2.85	3.30	4.35	7.30	8.45	8.25
Al	2.65	3.35	4.30	7.40	7.75	7.75
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1.81	1.67	1.67	1.67	1.84	1.80

BASES ECHANGEABLES mé pour 100 grs de sol

Calcium	1.87	1.78	0.88	1.00	0.82	0.92
Magnésium	1.15	1.30	0.82	1.10	0.86	0.95
Potassium	0.05	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01
Sodium	0.06	0.08	0.05	0.05	0.05	0.04
S.	3.13	3.22	1.78	2.18	1.75	1.92
T.	3.8	3.9	2.9	4.0	3.7	4.0
S/T = V %	82	83	61	55	47	48

ACIDITE ALCALINITE

pH eau	6.3	6.0	5.4	5.3	5.3	5.3
pH Chlorure de K.	5.3	5.0	4.1	4.0	3.8	3.8

SOLUTION DU SOL

Conductivité mmhos	0.035	0.039	0.038	0.026	0.023	0.023
Extrait sec. mg/100 g	28	31	30	21	18	18

TABLEAU N° A 12

- 123 -

Profil NAK 2 du Dahomey: Description

Description et prélèvements par WILLAIME et VOLKOFF (Avril 1966)

Périmètre d'Agonkamey (près de Cotonou) au DAHOMEY.

Climat sub'équatorial maritime dahoméen, de 4 saisons, avec température moyenne de 27° et pluviométrie annuelle moyenne de 1 300 mm.

Végétation de fourré dense, arbustif sans tapis herbacé avec îlots de bush arbustif. Le matériau est constitué de formations sédimentaires sablo-argileuses et gréseuses du Continental terminal.

Description:

0 - 10 cm :	Gris brun. Sableux. Particulaire, cohésion nulle, très nombreuses racines de tailles inférieures à 1/2 cm, très bonne friabilité. Passage très progressif.
10 - 20 cm :	Horizon d'imprégnation légèrement plus rouge. Sableux. Sans structure, particulaire, très nombreuses petites racines. Passage progressif.
20 - 30 cm :	Brun-rouge. Sableux. Particulaire, quelques agrégats très peu cohérents, très friables, très nombreuses racines, les plus grosses (1 cm) sont horizontales. Passage distinct.
30 - 400 cm :	Rouge (2,5 YR 5/6). Argilo-sableux. Aspect massif, débit en écailles de 5 cm d'épaisseur, structure polyédrique moyenne (polyèdres de 2 à 3 cm), porosité d'agrégat moyenne à faible, quelques remplissages (déjection de vers de terre), très bonne friabilité à l'état humide, assez nombreuses racines jusqu'au fond du trou, quelques revêtements argileux surtout visibles entre 30 cm et 1 m. Quelques termitières. Profil humide jusqu'à 1,50 m environ.

TABLEAU N° A 15 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL NAK 2

Echantillon N°	21	22	23	24	25	26	27	28
Profondeur en cm.	0-10	20-30	40-50	70-80	100-110	130-140	160-170	190-200

GRANULOMETRIE

Argile %	6,5	7,3	35,8	36,6	39,3	40,8	40,5	42,5
Limon fin %	1,5	0,5	2,3	2,8	2,8	2,5	3,5	3,0
Limon grossier %.	2,4	1,8	1,7	1,6	1,8	1,4	1,6	1,5
Sable fin %	22,1	23,3	12,7	16,0	10,1	9,5	10,1	10,5
Sable grossier %.	64,2	63,7	39,9	36,7	38,7	38,4	36,8	34,5
Humidité %	1,1	0,7	4,3	4,2	4,5	5,1	5,5	5,6

MATIERES ORGANIQUES

Mat.org.totale %.	1,8	0,7	0,7	0,6		0,6		
Carbone totale %	1,06	0,41	0,42	0,36		0,33		
Azote total %....	0,63	0,26	0,40	0,37		0,34		
C/N	16,8	15,6	10,5	9,6		9,8		
C.Humus total %.	1,68	0,86	1,02	0,71		0,53		
C.Ac.humiques %.	1,12	0,49	0,13	0,19		0,14		
C.Ac.fulviques%.	0,56	0,37	0,89	0,52		0,39		

ACIDITE

pH H ₂ O	5,8	5,7	4,8	4,8	5,0	5,0	5,2	5,6
---------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Is	0,3	0,6	1,8	1,4		0,5		
K cm/h	1,5	2,8	3,1	2,8		3,8		
pF 2,5 %.....	5,7	4,8	16,2	15,7		16,4		
pF 4,2 %	3,0	2,8	12,3	14,5		12,0		

BASES ECHANGEABLES (en milliéquivalents pour 100 grs)

Ca méq	2,19	2,19	0,78	0,72		1,31		1,56
Mg méq	0,94	0,42	0,72	0,47		0,39		0,65
K méq	0,43		0,10	0,09		0,08		0,11
Na méq	0,02	0,32	0,08	0,13		0,13		0,26
Somme méq	3,58		1,68	1,41		1,91		2,58

CAPACITE D'ECHANGE méq % ET TAUX DE SATURATION

T.	5,43		5,45	4,98		4,92		4,88
V. %.....	65		30	28		38		52

ACIDES PHOSPHORIQUES

P ₂ O ₅ Truog ppm .	30		30					
P ₂ O ₅ total % ..	0,49	0,60	0,60	0,65		0,64		

F E R

Fe ₂ O ₃ total(HCl)%	0,68	0,72	2,25	2,32	4,49	2,85	3,15	4,40
--	------	------	------	------	------	------	------	------

BASES TOTALES (Attaque nitrique)

Ca méq	3,36	2,80	2,60	2,24		3,68		
Mg méq	1,04	0,88	0,84	0,96		1,28		
K méq	0,96	0,90	0,70	0,83		1,69		
Na méq	1,17	2,61	2,39	2,39		2,96		
Somme méq	6,53	7,19	6,53	6,42		9,61		

TABLEAU N° 16

Profil HF 3 de Haute-Volta: Description

0 - 12 cm:	Horizon gris-clair - texture de sables moyens - structure lamellaire moyenne à débit grumelleux - s'éclaircissant très progressivement vers le bas - porosité élevée, friabilité forte - riche en fines racines - à la loupe nombreux grains de quartz groupés sous forme de pseudo-sables - à la base de cet horizon quelques grosses racines - transitions très progressives à l'horizon suivant.
12 - 60 cm:	Horizon rouge - texture sablo-progressivement argileuse - structure polyédrique fine à débit nuciforme - cohésion faible à moyenne - porosité bonne avec nombreuses traces de racines recouvertes d'un enduit lisse - friabilité moyenne à forte - racines peu nombreuses mais bien réparties - toujours riche en pseudo-sables - micro-porosité tubulaire forte.
60 - 100 cm:	Semble avoir les mêmes caractéristiques mais a une texture légèrement moins argileuse - a une friabilité plus grande et contient quelques petits gravillons assez durs de grès à faces lisses. Passage très progressif à l'horizon suivant.
100 - 140 cm:	Caractérisé par une plus grande richesse en morceaux ou gravillons de grès ferruginisés - une texture sablo-légèrement argileuse - une structure un peu plus large - une friabilité un peu plus forte, des racines bien réparties - une cohésion faible à moyenne - une porosité tubulaire très élevée - les traces de racines carbonisées sont nombreuses et lisses.
140 - 185 cm:	Horizon devenant bariolé de gris clair avec nombreuses taches rouges - présence de concrétions assez grosses de 1 cm - rouges foncées - cassables à la main - assez lisses extérieurement - il s'agit très nettement de morceaux de grès dont on voit l'altération - la texture de la partie fine est sablo-argileuse à sables grossiers - la structure polyédrique moyennement développée, de taille assez fine - la cohésion moyenne - la micro-porosité très élevée - la friabilité est moyenne - moins élevée que dans l'horizon supérieur. Certaines concrétions semblent de néo-formation - mais sont toujours d'une dureté faible.
185 - 200 cm:	Horizon bariolé de gris et de rouge-brun, les zones ferrugineuses étant moyennement indurées et contenant des zones ocres - jaunes, les secteurs gris-clairs étant très friables - la texture du grès est encore reconnaissable - la cohésion est faible à moyenne - la porosité tubulaire est encore élevée. En profondeur, la dureté augmente très rapidement - les taches grisâtres devenant cependant plus importantes. Le passage est progressif, la roche saine semble être très profonde d'après l'examen de coupes voisines.

TABLEAU N° A 17 - FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL HF 3

- 126 -

Horizon	1.1	2.1	2.21	2.22	2.23	2.3
Groupe moyennement désaturé ..	921	921	921	921	921	921
Sous-groupe: modal	9211	9211	9211	9211	9211	9211
Famille: grès	43	43	43	43	43	43
Région: Haute-Volta	3243	3243	3243	3243	3243	3243
Numéro du sac	31	32	33	34	35	36
Profondeur minimale en cm. ...	0.1	12	60	100	140	185
Profondeur maximale	12	60	100	140	185	220

GRANULOMETRIE EN 10^{-2}

Argile	3.50	28.2		27.0	24.7	11.2
Limon fin	0.50	3.70		6.50	11.5	12.2
Limon grossier)	38.3	26.1		28.4	30.0	29.7
Sable fin)						
Sable grossier	57.7	42.0		40.4	38.1	46.9

MATIERES ORGANIQUES EN 10^{-3}

Carbone	2.5	3.3	1.6	1.5	1.3	1.3
Azote	0.22	0.22	0.17	0.18	0.19	0.13

ACIDITE

pH eau 1/2,5	5.6	5.3	5.3	5.4	5.4	5.5
pH Chlorure de K	4.3	3.8	3.8	3.7	3.7	3.9

CATIONS ECHANGEABLES EN $m\acute{e}$ ET SATURATION DU COMPLEXE

Calcium	0.76	0.52	0.42	0.37	0.26	0.43
Magnésium	0.56	1.17	0.86	0.71	0.81	0.88
Potassium	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
Sodium	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03
Somme des bases	1.38	1.73	1.35	1.14	1.18	1.36
Capacité d'échange	1.70	4.50	5.20	5.00	10.2	4.00
Taux de saturation %	81	38	26	22	11	34

ACIDE PHOSPHORIQUE EN 10^{-3}

Phosphore total	0.15	0.25	0.16	0.20	0.13	0.19
-----------------------	------	------	------	------	------	------

FER LIBRE

Fe_2O_3 en %	1.28	2.79	2.91	3.01	3.01	7.71
----------------------	------	------	------	------	------	------

DEUXIEME PARTIE

LES MECANISMES DE LA PEDOGENESE

INTRODUCTION : LA METHODE D'ETUDE

En première partie, l'opposition entre l'homogénéité des sols rouges et l'hétérogénéité des roches-mères a été soulignée plusieurs fois. Définir les mécanismes de la pédogénèse revient donc à rechercher comment des matériaux originels très différents se transforment en donnant des sols à grande ressemblance.

Les deux faciès de roches-mères les plus différents que l'on peut opposer sont d'un côté des sables peu argileux, blancs, de l'autre des grès argileux ferruginisés. Ce sont ces deux types extrêmes de matériaux originels dont nous étudierons, comparativement, la transformation progressive en sols.

Les sols sont interdépendants sur les modelés, car leur évolution peut être influencée par celle des profils en amont. Pour cette raison nous examinerons deux toposéquences et non des profils de sols isolés.

Les toposéquences

Deux toposéquences ont été choisies, l'une en Casamance (Sénégal), l'autre à Orodara (Haute-Volta). Elles ont été retenues, car les matériaux qui se trouvent sous les sols sont très différents, alors que les sols eux-mêmes sont très comparables sur le plan morphologique. Mais il est évident que ces deux catégories de roches-mères, sous les sols actuels, ne correspondent pas forcément aux sédiments qui ont effectivement été transformés en sols.

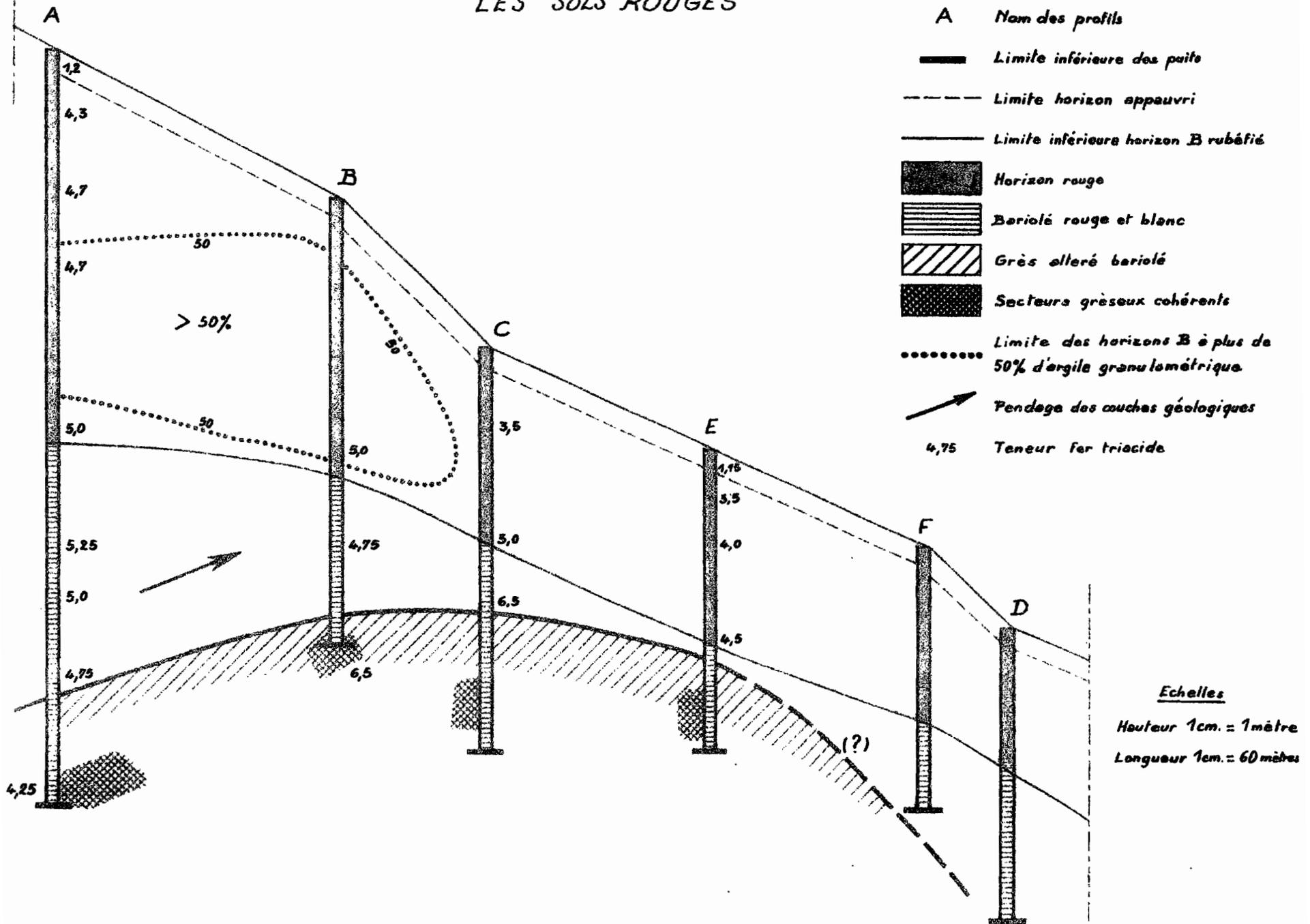
La toposéquence de Casamance est développée sur des roches-mères argilo-gréseuses, et celle d'Orodara sur des sables variés, pauvres en fer.

La toposéquence de Casamance est présentée par la figure n° B 1 complétée par le tableau n° B 1. Les profils retenus dans le texte se limitent à quatre, A, B, C, E ; les profils qui leur font suite, rouges ou beiges du type des sols ferrugineux tropicaux, ont été écartés de ce travail.

La toposéquence de Haute-Volta est présentée dans la figure B 2. Les profils retenus sont les sols rouges HFA, HF 33 et HFB ; le profil HFA avait été présenté en première partie.

Fig. B1 TOPOSÉQUENCE DE SÉFA (CASAMANCE)

LES SOLS ROUGES

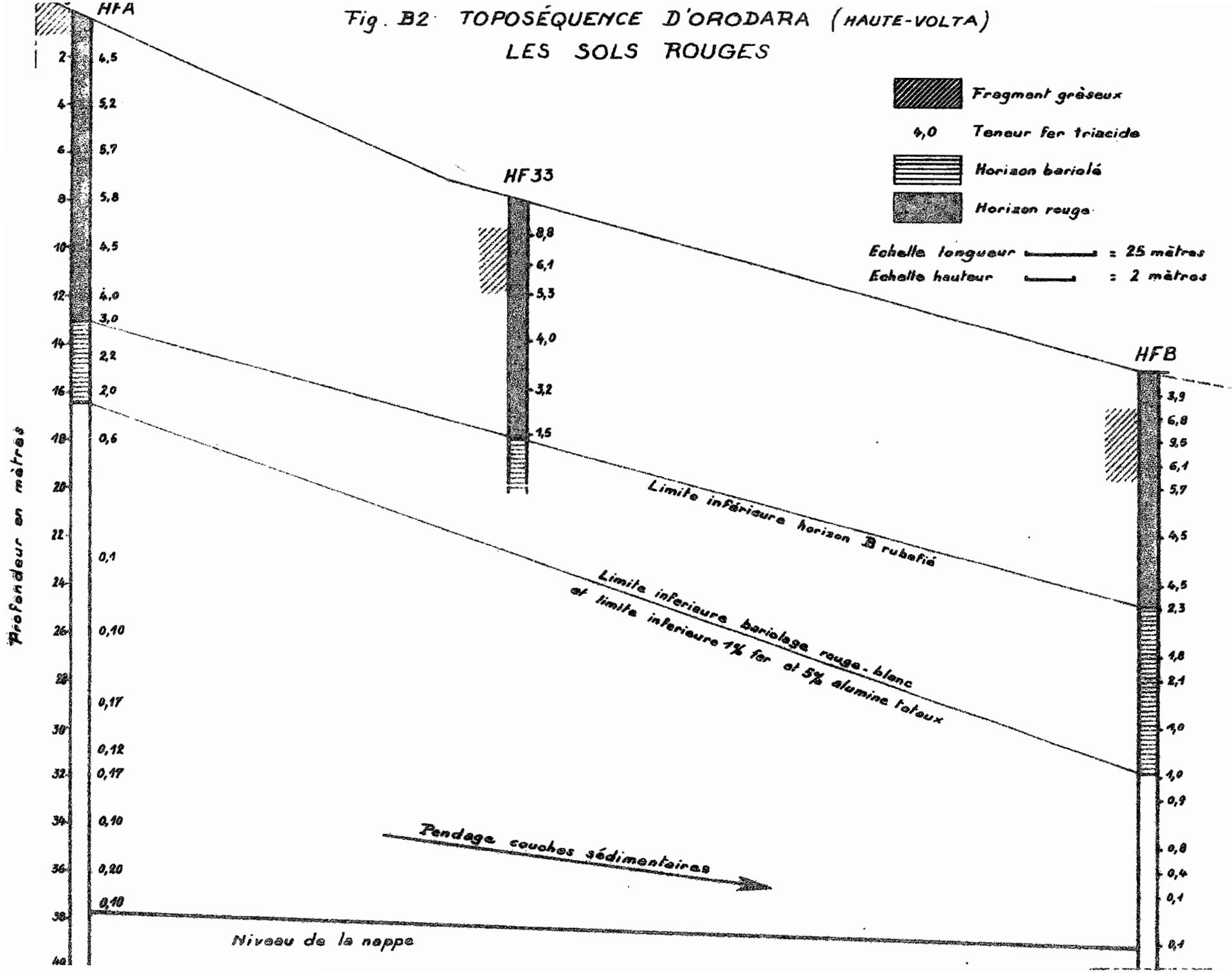


COMPARAISON A NIVEAU EGAL DES PRINCIPAUX CARACTERES

MORPHOLOGIQUES DES PROFILS

Cote Référence	Profil A	Profil B	Profil C	Profil E	Profil Seguy	Profil D
0 mètre	Surface profil à la cote 0 mètre	Surface profil à la cote 3 mètres	Surface profil à la cote 6 mètres	Surface profil à la cote 8 mètres	Surface profil à la cote 10mètres	Surface profil à la cote 11mètres
7 mètres	Horizon B 430 Rouge argilo-sableux 2,5YR 6/8	Horizon B 454 Rouge argilo-sableux	Horizon B 478 Rouge argilo-sableux			
9 mètres	Horizon B 434 Horizon rouge 2,5YR 5/8 présence secteurs décolorés déferrifiés	Horizon B 458 Rouge foncé argilo-sableux	Horizon B 482 Rouge foncé argilo-sableux	Horizon B 518 Rouge argilo-sableux.		
11 mètres	Horizon C 438 Rouge 2,5 YR 5/8 hétérogène avec zones décolorées sablo-argileux	Horizon BC 462 Rouge avec présence de secteurs colorés déferrifiés.	Horizon BC 486 Terre fine rouge avec nombreux fragments gréseux indurés violet à auréole ocre.	Horizon B 522 Horizon rouge argilo-sableux	Horizon B Seg.12 Horizon rouge argilo-sableux	Horizon A 491 Horizon supérieur organique sans éléments grossiers.
12 mètres	Horizon C 540 Rouge clair, friable, zones décolorées roses et blanches déferrifiées.	Horizon C 464 Grès violet fragmenté, peu d'éléments fins - cortex rouge.	Horizon C 488 Grès fragmenté violet avec auréoles de décoloration, terre fine rouge clair	Horizon BC 524 Rouge clair argilo-sableux, petites taches de décoloration	Horizon B Rouge clair argilo-sableux sans éléments grossiers	Horizon B 500 Rouge clair argilo-sableux sans éléments grossiers.
14 mètres	Roche-mère 544 Terre fine rose, sablo-argileux, avec fragments gréseux ocre brun et poches sable blanc.		Roche-mère 592 Grès fragmenté ocre brun avec terre fine jaune clair.	Horizon C 528 Grès indurés brun foncé discontinu, peu de terre fine.	Horizon BC 603 Rouge clair avec apparition taches décolorées déferrifiées.	Horizon B 502 Rouge clair argilo-sableux sans éléments grossiers.

Fig. B2 TOPOSÉQUENCE D'ORODARA (HAUTE-VOLTA)
LES SOLS ROUGES



Compte-tenu de la grande épaisseur des horizons B de tous les sols, il nous a semblé judicieux de procéder en deux étapes :

- 1) définir la transformation des roches en horizons C et B
- 2) étudier la transformation de ces horizons B en horizons supérieurs "appauvris".

La méthode d'étude latérale des profils

L'étude de la transformation d'une roche granitique ou basaltique en un matériau d'altération et en sols ferrallitiques a été tentée plusieurs fois. En particulier par : SEGALEN (1957) , BONIFAS (1958), LENEUF (1959), LELONG (1964 et 1968), DELVIGNE (1965), SIEFFERMANN (1969), SIEFFERMANN et MILLOT (1969). Les bilans effectués à cette occasion ont été établis en comparant les horizons successifs A, B et C à la composition de la roche, plus ou moins saine, prélevée en profondeur. MILLOT et BONIFAS (1955) ont proposé une méthode "isovolumétrique" qui permet la détermination de bilans absolus.

Dans le cas des roches sédimentaires stratifiées, le raisonnement isovolumétrique ne peut malheureusement être appliqué. En effet, la comparaison des divers horizons aux niveaux profonds de roches-mères n'est pas possible, car rien n'indique que les matériaux prélevés en profondeur sous les sols sont comparables à ceux qui ont été transformés effectivement en horizons B et A actuellement observables. En particulier, la mise en place des niveaux du Continental terminal a pu être faite dans le cadre d'une séquence évolutive positive (MILLOT, 1964), les niveaux étant de plus en plus riches en éléments fins en remontant vers la surface. La richesse en argile des horizons supérieurs pourrait donc ne pas être mise au compte de la pédogénèse, mais à celle de la sédimentation.

Pour tourner cette difficulté, nous avons tenu compte des observations des géologues sur le faible pendage des différentes couches sableuses ou gréseuses en Casamance et en Haute-Volta. S'il est possible de s'assurer d'une homogénéité suffisante, sur le plan latéral, des couches successives lors de leur dépôt, il devient alors théoriquement possible de comparer un

horizon B d'un sol au matériau originel qui lui avait le plus probable-ment servi de roche-mère. Pratiquement, cette dernière peut en effet être assimilée aux matériaux placés sous des profils rouges situés plus en amont sur la pente. Cependant, il faut remarquer que ces roches mères actuellement non transformées en sol ne sont pas forcément équivalentes à celles mises en place lors du dépôt. Elles ont pu subir certaines transformations, altérations ou effets de nappes au cours du temps. Cependant, elles représentent la meilleure approximation possible du matériau de départ. La méthode consiste donc, après avoir vérifié la probabilité de l'homogénéité latérale des couches, à étudier la pédogénèse non seulement dans le cadre classique de profils verticaux, mais surtout dans celui de profils définis latéralement.

Cette méthode que nous proposons d'appeler méthode "des profils latéraux" nous a semblé la seule méthode utilisable pour aborder des bilans sur roches sédimentaires stratifiées. Elle présente une difficulté majeure, celle de s'assurer au préalable de l'homogénéité latérale des couches du matériau originel. L'étude du squelette sableux nous a semblé la première voie d'approche à essayer, à condition de poser l'hypothèse de travail suivante :

Dans des prélèvements comparés latéralement toute modification importante des teneurs en éléments (argile et fer par exemple), lorsque la répartition granulométrique des sables est strictement la même, a des chances de provenir d'une évolution ultérieure. Cela revient à dire qu'il est peu probable que des dépôts sensiblement horizontaux de sables répartis exactement dans les mêmes classes granulométriques, ont une richesse en éléments fins, argile et limon, et des teneurs en fer très différentes. En pratique, les risques d'utiliser une telle hypothèse sont réduits s'il est possible de montrer que le bilan de la transformation est toujours le même, latéralement, quelle que soit la variabilité des caractéristiques des roches-mères. Dans ces conditions, il devient en effet improbable qu'à chacun des niveaux subhorizontaux successifs, la mise en place de matériaux différents ait fait coïncider une grande concordance du

classement des sables avec une variation importante des teneurs en autres éléments du milieu. La probabilité d'un phénomène d'origine uniquement sédimentaire sera encore plus faible si les résultats sont identiques sur plusieurs toposéquences.

C'est donc afin de caractériser l'homogénéité, ou non, des matériaux originels des sols dans chacune des deux toposéquences, que nous allons nous pencher, en premier lieu, sur l'étude du squelette minéral sableux.

CHAPITRE IV

LE SQUELETTE SABLEUX ET SON DEVENIR DANS LES TOPOSEQUENCES

A - DEFINITIONS

Nous entendons par "squelette sableux", l'ensemble des sables, c'est-à-dire des particules dont la taille est supérieure à 50 microns. Les sables représentent 50 à 90 % du poids du sol. Ils constituent un support, peu susceptible de déplacement à l'intérieur du profil. Ce support sableux peut être caractérisé soit par sa granulométrie, soit par des observations optiques.

Les déterminations granulométriques par tamisage ont permis de séparer 12 classes de tailles différentes. Compte tenu de l'existence des "pseudo-sables", ces déterminations ont été refaites après attaque par acide chlorhydrique 4 N. Les deux séries de résultats, quand elles ne concordent pas, ont été utilisées dans les raisonnements. Nous n'avons cependant pas perdue de vue que l'attaque des sables par l'HCL, peut provoquer une désagrégation des grains de quartz (CHAUVEL et PEDRO, 1967), susceptible de fausser les résultats. Différentes méthodes de présentation de ces derniers (courbes en ordonnées arithmétiques ou logarithmiques, calculs de différents indices) ont été essayées (BILLY, 1954 ; DOEGLAS, 1958 ; BERTHOIS, 1965). Le texte n'en présentera qu'une sélection.

Les observations optiques ont été effectuées dans de nombreux cas :

- soit par étude de la forme des sables et de leur état de surface.
- soit par des observations micromorphologiques, sur plaques minces.
- soit par des déterminations minéralogiques.

L'étude du squelette sableux sera présentée en deux parties.:

- La première concernera les granulométries comparées, faites suivant la méthode d'étude latérale des profils. Les résultats sont fournis en partant des niveaux de roches-mères, et en remontant progressivement dans les profils.

- La seconde partie concernera l'étude de ce squelette sableux par les méthodes optiques, en particulier micromorphologiques, mais cette fois uniquement dans des profils verticaux.

B - LES DONNES GRANULOMETRIQUES SUR "PROFILS LATERAUX"

1) Réalité de l'hétérogénéité des roches-mères

Les profils HFA et HFB, (Haute-Volta) très profonds, permettent mieux de caractériser les roches-mères que les profils de la toposéquence de Casamance dont un seul puit dépasse 11 mètres.

La figure B 3, par des courbes en ordonnée arithmétique pour le puit HFA, montre la grande variabilité de la répartition par taille des sables des roches-mères des grès cambriens ; la courbe 14 étant la seule qui corresponde à un horizon de sol. Le prélèvement le plus profond a été effectué à 22,50 m.

Le tableau n° B 2 qui suit fournit un certain nombre de "variables calculées" de la granulométrie des sables depuis l'horizon de surface (HFA 1) jusqu'à 13,50 m (HFA 30). On remarquera que les niveaux non transformés en sol, c'est-à-dire les n° 19, 21, 26 et 30, ont des médianes assez différentes de celles des horizons qui les surmontent. Elles leur sont, en particulier, supérieures en taille.

L'examen des courbes granulométriques de divers puits extérieurs aux toposéquences a fourni des indications du même ordre. On peut donc conclure que la granulométrie des sables des roches-mères sédimentaires peut

Fig. B3

GRANULOMÉTRIES DE LA FRACTION
SABLEUSE DES ROCHES-MÈRES
(PROFIL HFA , HAUTE-VOLTA)

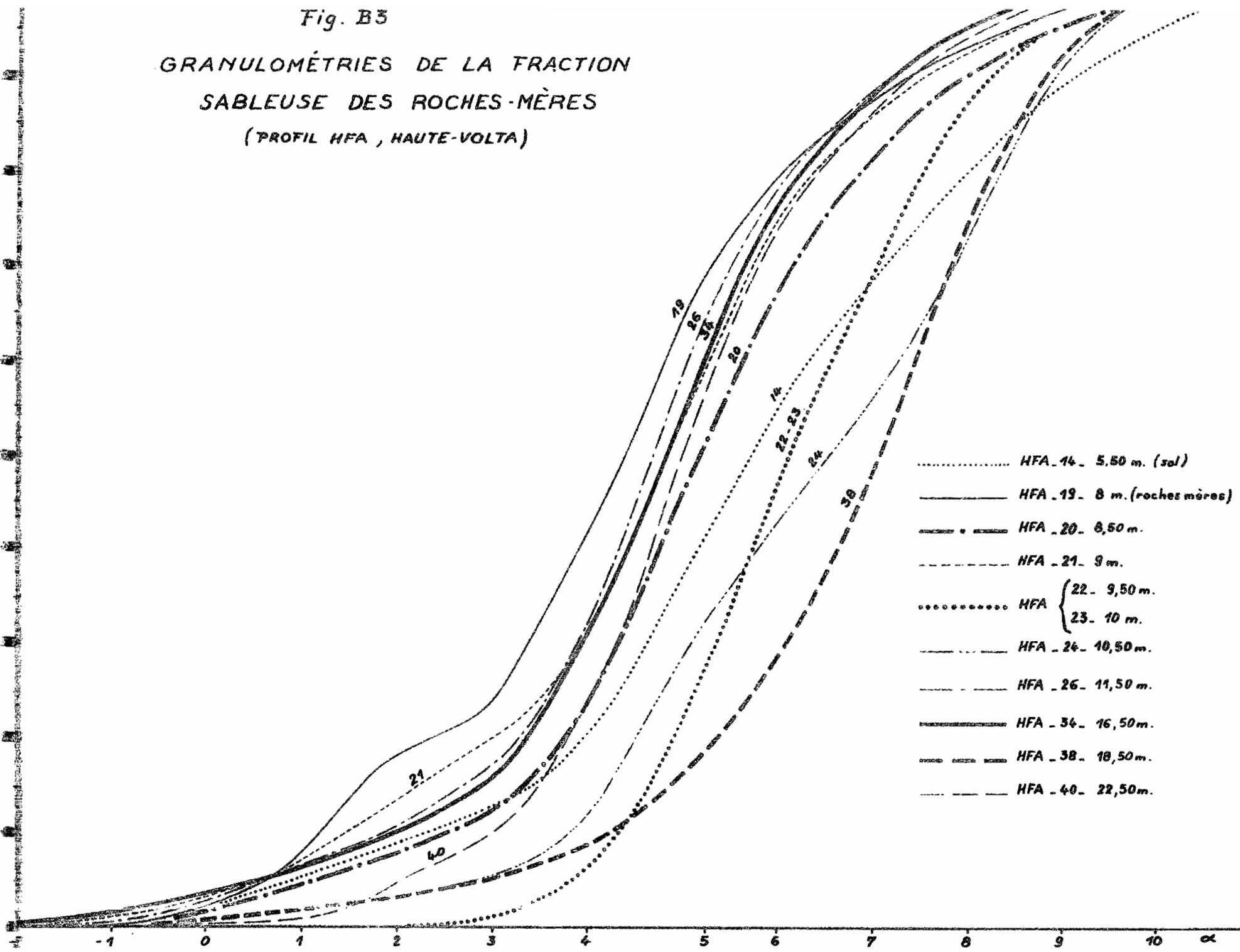


TABLEAU N° B 2 - Granulomètre des sables du PROFIL HFA
Sol rouge de Orodara (Haute-Volta)

Profil	Profondeur	Médiane	Q d ϕ	He	Ecart	F a c i è s
H F A						
1	0-10	265	0,48	0,48	-	Bimodal
2	20	260	0,53	0,50	-	"
3	40	265	0,51	0,48	-	"
4	60	260	0,54	0,56	-	"
5	100	262	0,53	0,52	-	"
6	150	240	0,59	0,55	0,04	"
7	200	240	0,65	0,61	0,04	"
9	300	220	0,72	0,68	0,04	Parabolique; légère dispersion
10	350	250	0,90	0,80	0,10	Parabolique; dispersion aléatoire à partir de 0,5 m/m
11	400	235	0,65	0,59	0,06	"
13	500	260	0,69	0,59	0,10	"
15	600	270	0,60	0,50	0,10	"
16	650	320	0,73	0,55	0,18	"
17	700	330	0,50	0,50	-	Bimodal
19	800	375	0,61	0,57	-	"
21	900	330	0,50	0,39	0,11	Tendance logarithmique
26	1150	340	0,50	0,38	0,12	Log: importante dispersion aux grands diamètres
30	1350	300	0,32	0,30	-	"

Q d ϕ : de Krumbein - écart des dimensions entre le 1er et le 3ème quartile (1936)

He : indice d'hétérométrie de Cailleux.

Ecart : Ecart-type.

Analyses effectuées par le laboratoire de Géologie des SSC-Boudy (Mme DELAUNE).

être très variable sur de faibles distances verticales (de l'ordre du mètre). Dans ces conditions, il se confirme qu'il n'est pas possible de comparer les caractéristiques des horizons des sols à celles des niveaux sous-jacents profonds, la sédimentation ayant pu mettre en place des dépôts successifs très différents. Cette forte hétérogénéité granulométrique, d'origine sédimentaire, suggère l'existence possible de variations latérales, à faibles distances, sous forme de lentilles, ou de dépôts en biseaux. Elle incite donc à la prudence dans les essais de comparaison latérale. De plus, on peut craindre que cette hétérogénéité ait pu influencer la pédogénèse, en particulier en facilitant la circulation oblique préférentielle des eaux de drainage, ou en permettant la précipitation d'éléments ferrugineux dans des dépôts localement plus grossiers. L'interprétation des effets de la pédogénèse dans les toposéquences doit donc tenir compte des variations latérales possibles du squelette sableux.

Cependant, il faut noter dès maintenant que l'ampleur des variations de la répartition granulométrique semble diminuer nettement, dans les horizons de sol, au-dessus des roches-mères étudiées. En particulier, les refus aux tamis de deux millimètres, fréquents dans les roches-mères des profils HFA et HFB, disparaissent dans les horizons rubéfiés. C'est le cas des "yeux" de quartz (galets décimétriques) qui ont servi d'ailleurs à dénommer les grès de Bobo-Dioulasso. Mais il n'est pas possible de dire si cet état de fait résulte d'un héritage de la sédimentation, ou si la pédogénèse a "oblitéré" certains de ces caractères.

En définitive, compte tenu de la forte hétérogénéité des dépôts sédimentaires sur le plan vertical, la comparaison et la corrélation de ces dépôts sur des plans horizontaux ou sub-horizontaux se confirme comme la seule solution pratique. Elle seule peut nous assurer du type le plus probable de roche-mère en un point donné d'un sol.

2) Corrélations latérales dans les niveaux de roches-mères

2.1 - En Haute-Volta

Les profils HFA et HFB sont distants de 350 mètres. L'examen de l'ensemble des courbes granulométriques des sables, en profondeur, indique une étroite correspondance dans les différentes variations de la granulométrie. Les valeurs successives des médianes et des modes se correspondent. Les courbes, dessinées en échelle \propto et en ordonnée arithmétique, ont des formes identiques aux différents niveaux qui se suivent.

Cependant cette correspondance se réalise avec une dénivellée d'environ 50 cm par rapport à un niveau horizontal théorique. Il y aurait donc un pendage des dépôts de 1,5 pour mille dans la même direction que celui de la surface topographique actuelle. Cela ne veut pas dire, d'ailleurs, que la direction de la plus forte pente de la topographie soit la même que celle du pendage des couches sédimentaires.

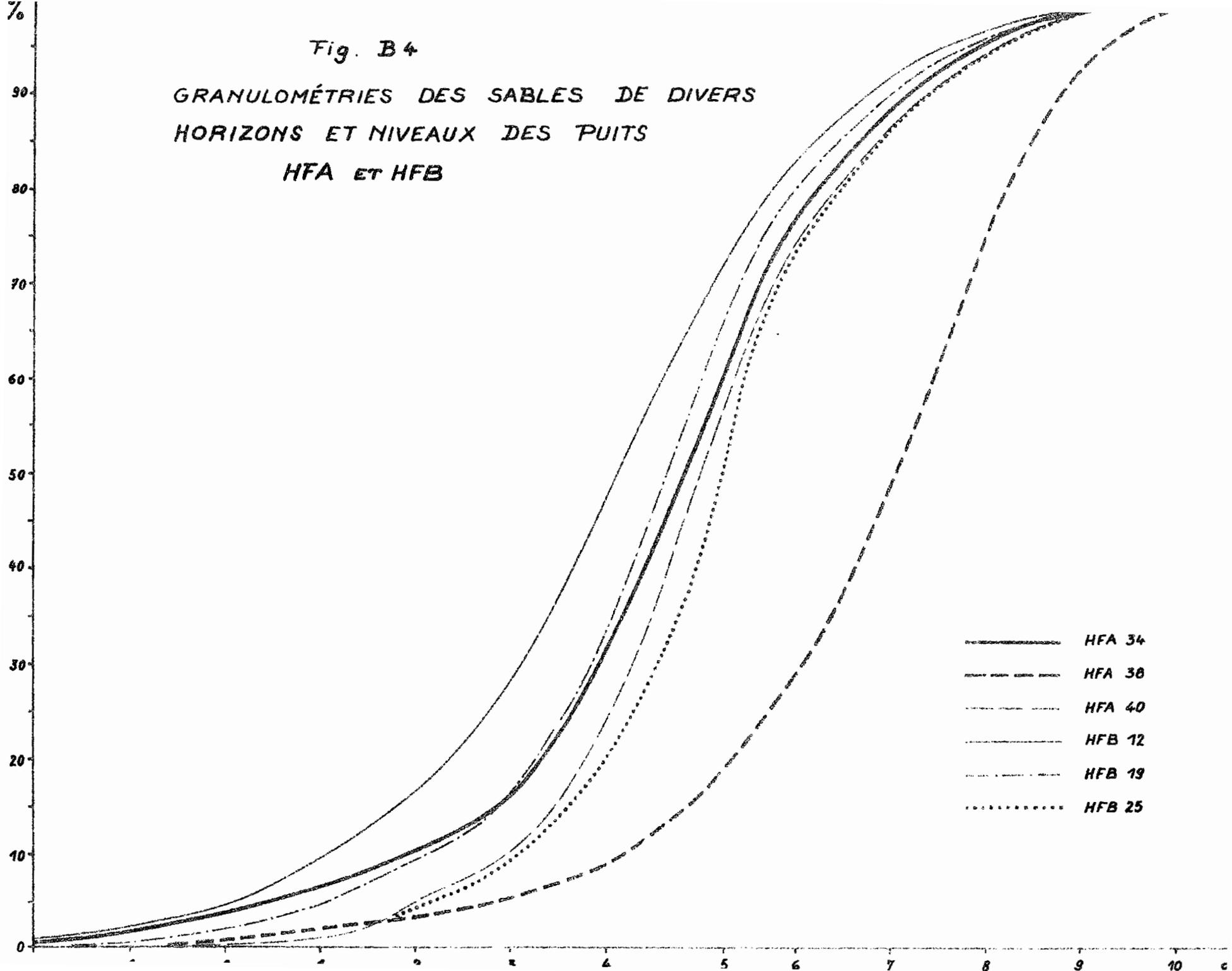
Parmi les niveaux dont la correspondance est reconnue en profondeur dans les puits, nous présentons les deux couples HFA 40 - HFB 25 et HFA 34 - HFB 19. Les prélèvements HFA 40 et HFA 34 sont à des profondeurs de 22,50 m et 16,50 m. Bien que très voisines, les courbes des couples respectifs ne se superposent pas exactement (cf. figure B 4).

Plusieurs explications peuvent être envisagées :

- une homogénéité absolue des matériaux à l'épandage est peu probable du fait du mode de mise en place par un transport d'oueds, et de faibles variations suffisent à décaler les courbes. Or, les différences portent sur des pourcentages faibles dans certaines classes granulométriques.
- la méthode de tamisage des sables n'est pas d'une grande précision.
- le pendage des couches peut être légèrement différent de la valeur adoptée. En effet, l'écartement des prélèvements (50 cm) sur le profil est trop grand pour que l'on puisse assurer une corrélation exacte des niveaux sur les deux profils.
- enfin, il ne faut pas éliminer la possibilité d'une éventuelle transformation du matériau comme conséquence de la pédogénèse. Cette transformation pourrait être plus importante dans le puits HFB que dans le puits HFA.

Fig. B4

GRANULOMÉTRIQUES DES SABLES DE DIVERS
HORIZONS ET NIVEAUX DES Puits
HFA ET HFB



Afin de préciser cette question, les résultats des tamisages de sables ont été regroupés en sept classes granulométriques (Tableau N° B 3).

TABLEAU n° B 3 - Comparaison des matériaux sous les profils HFA et HFB
(Toposéquence de Haute-Volta)

	HFA 40 (22,50 m)	HFB 25		HFA 34 (19,50 m)	HFB 19
	+ et -	+	-	+ et -	+ et -
Argile + Limon %	3,0	5,2		3,4	4,9
Fer total %	0,10	0,17		0,12	0,31
Sables 1,65 - 2 mm	0,5	0,2	0,1	1,2	0,4
1,65 - 0,80	3,3	1,7	1,5	5,2	5,0
0,80 - 0,49	5,8	9,1	9,0	8,3	11,7
0,49 - 0,25	63,7	68,5	68,8	61,8	62,6
0,25 - 0,12	25,4	17,4	17,6	20,8	16,7
0,12 - 0,08	1,2	2,3	2,4	1,9	1,6
0,08 - 0,005	0,1	0,8	0,6	0,2	0,5
Morphologie	Sables blancs tachés de points ocres	Sables blancs quelques fragments grésifiés		Sables blancs tachés de ocres	Sables blancs roses, quelques secteurs rougeâtres
+ avec déferrification des sables par HCL - sans déferrification des sables par HCL					

La lecture de ce tableau confirme que dans chacun des couples les prélèvements ont des caractéristiques voisines. De plus, les différences sont négligeables par rapport à celles relevées sur les plans verticaux. Dans ces conditions, nous sommes en droit de corréliser les niveaux sur le plan latéral. L'homogénéité des roches-mères étant ainsi définie, nous pouvons poursuivre la caractérisation du squelette sableux en remontant progressivement vers les horizons des sols.

2.2 - En Casamance

En ce qui concerne la toposéquence de Casamance, la comparaison des matériaux dans les différents puits a été plus limitée. Les sols rubéfiés sont très profonds et les prélèvements correspondent rapidement à des horizons C. Cependant, la comparaison systématique de tous les résultats de tamisage de sables a mis en évidence un pendage des couches en sens contraire de celui de la surface topographique actuelle. Ce pendage est de 7,5 pour mille, sur l'axe de la toposéquence. Ainsi, le niveau gréseux qui apparaît à 15 mètres, dans le profil A, vient se terminer à 9 mètres de profondeur dans le profil B, où il semble digéré par pédogénèse. La direction et le pourcentage exacts du pendage des couches sédimentaires ne peuvent pas être déduits de l'étude d'une seule toposéquence. Mais ils sont probablement en rapport avec un mouvement de basculement ou de gauchissement qui a abaissé relativement la Basse-Casamance, et fait plonger dans la mer certains affleurements gréseux ou cuirassés.

La correspondance latérale a pu être faite entre les profils A et B. Mais entre les profils B et C et C et E le pendage initial se révélerait légèrement plus faible. Malheureusement, ces derniers profils n'ont pu être creusés suffisamment pour permettre des comparaisons au niveau des roches-mères. Cette modification du pendage peut être le résultat d'une sédimentation entrecroisée, ou de la mise en place des sédiments en lignes de crêtes ou en chenaux. Cependant la possibilité d'un tassement des couches sur la partie aval des pentes nous semble également une hypothèse à ne pas écarter. Ce tassement pourrait être dû à un soutirage au vide. Cette éventualité nous a fait éliminer de l'étude les profils de sols "rouge" situés dans la moitié inférieure des pentes. Dans les profils en amont, sous réserve de la correction du pendage, les corrélations latérales sont donc possibles.

2.3 - Conclusions

En conclusions, les résultats positifs de la comparaison des roches-mères sous les profils de sols nous incite à poursuivre l'étude du bilan de la pédogénèse dans des profils sub-horizontaux. Dans le cas, peut-être très particulier, des deux toposéquences, les niveaux sédimentaires sont, sinon

identiques, du moins très semblables. Cependant, cette similitude semble de moins en moins stricte, quand on remonte dans les puits et qu'on se rapproche de la limite inférieure des sols rubéfiés.

Il faut rappeler que les matériaux ainsi définis ne sont pas forcément identiques à ceux qui ont été déposés. Ces derniers, avec le temps, ont pu être affectés par des diagénèses ou des altérations avant de subir l'action de la pédogénèse. Les circulations d'eaux de nappe, d'ailleurs conséquences plus ou moins indirectes des pédogénèses en surface, ont pu modifier les matériaux originels eux-mêmes. RUELLAN (1969) est arrivé à une conclusion identique pour les sols du Maroc.

Mais pour nous, l'essentiel est que les roches-mères soient semblables entre elles en tant que matériaux originels de la pédogénèse. De plus, cette similitude a pu être définie par l'étude des squelettes sableux.

3) Passage des roches-mères à des horizons B différenciés

3.1 - En Haute-Volta

Lorsque l'on poursuit la comparaison des granulométries de sables en remontant dans les puits on constate qu'à un niveau de roche-mère du profil HFA correspond un niveau considéré comme horizon C du profil HFB.

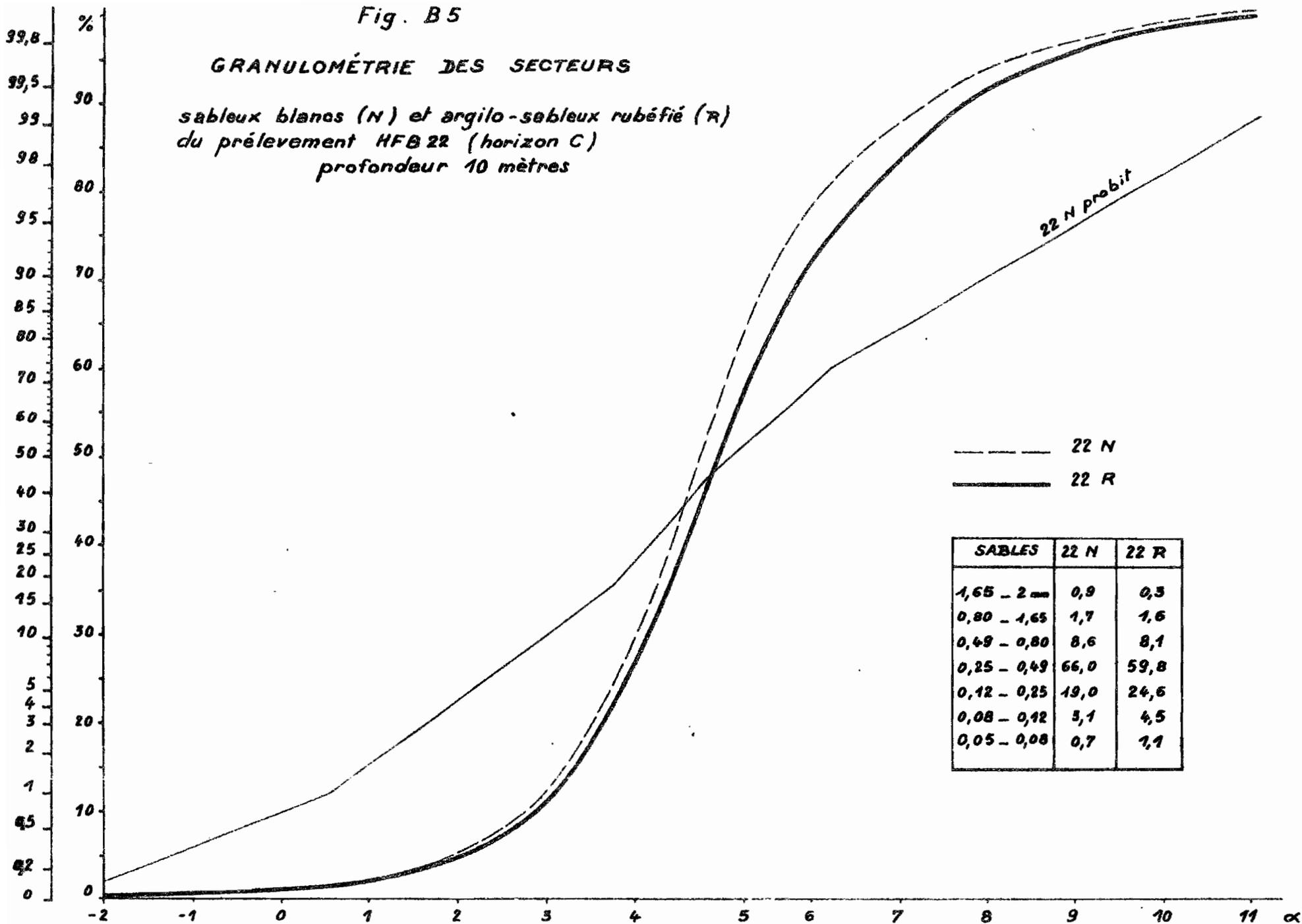
La roche-mère HFA est un sable blanc, homogène, légèrement argileux, non cohérent. L'horizon C de HFB est alors hétérogène, constitué de deux phases, l'une de sables blancs, l'autre de noyaux sablo-argileux, rubéfiés, présentant une certaine cohésion. La transition aux horizons rubéfiés du sol sus-jacent se réalise entre les prélèvements HFB 22 et HFB 19 (soit sur une distance de 1,50 m) par une augmentation de l'importance des secteurs sablo-argileux rubéfiés. Peu à peu ces derniers envahissent tout l'ensemble de l'horizon.

Dans le prélèvement le plus profond, HFB 22, les granulométries de sables ont été faites sur les deux phases, séparément (figure B 5). Les courbes sont très voisines. Cependant, les secteurs rubéfiés sont un peu plus riches en sables fins, moins riches en sables grossiers, et surtout en sables

Fig. B5

GRANULOMÉTRIE DES SECTEURS

sableux blancs (N) et argilo-sableux rubéfié (R)
 du prélèvement HFB 22 (horizon C)
 profondeur 10 mètres



de taille moyenne que les secteurs blancs. Ces derniers contiennent nettement moins d'argile et de fer total que les secteurs rouges.

La comparaison des niveaux HFA et des seuls secteurs sableux blancs de HFB montre que les squelettes quartzeux sont similaires, et donc que leur roche-mère était très probablement la même. L'enrichissement en noyaux argileux rubéfiés peut donc être considérée comme postérieure à la sédimentation. Il s'agit vraisemblablement du mode d'approfondissement du sol au dépend des matériaux sableux. Cet appauvrissement représente donc un front discontinu. C'est cette hétérogénéité qui permet la distinction entre l'horizon C et l'horizon B sur le terrain.

En remontant encore dans les profils, la comparaison peut se faire, non plus entre les roches-mères et l'horizon C du sol rouge HFB (cas précédent) mais entre la roche-mère et l'horizon B₂, rubéfié, argilo-sableux et bien caractéristique. C'est le cas du couple HFA 26 - HFB 11. HFA 26 est constitué de sables blancs légèrement argileux, à taches ocres et rouges ; HFB 12 d'argile sableuse rouge 2,5 YR structurée, dans laquelle on trouve quelques rares secteurs blancs, ou blancs rosés, moins cohérents.

Malgré les différences de morphologie, de texture argileuse et de rubéfaction, les squelettes sableux sont similaires. En effet, la courbe granulométrique HFA 26, comparée à toutes les courbes de HFB, se rapproche des seules courbes HFB 11 et HFB 12. Mais la similitude est nettement moins bonne que pour les niveaux profonds. Il n'est pas possible de préciser si l'origine de cette différence est d'ordre sédimentaire ou non.

Cependant, pour tous les couples qui ont été étudiés par la méthode des profils latéraux dans les trois cas suivants :

roche-mère HFA - roche-mère de HFB

roche-mère HFA - horizon C de HFB

roche-mère HFA - horizon B de HFB

Les différences constatées concernent essentiellement, et toujours, une légère diminution des sables grossiers et moyens, et une augmentation relative des sables fins.

Or, cette observation a été faite également dans le niveau bariolé de HFB 22 entre les secteurs sableux et les noyaux sablo-argileux rouges. L'hypothèse d'une légère modification de la granulométrie des quartz en rapport avec les mécanismes de la pédogénèse pourrait donc être envisagée. En tout cas, cette modification est toujours liée à une argilification et une rubéfaction, ainsi qu'à une diminution des éléments grossiers de taille supérieure à 2 mm.

3.2 - En Casamance

La même étude systématique a été réalisée sur la toposéquence de Casamance, compte tenu du pendage oblique des roches-mères. Le dépouillement des courbes a été satisfaisant, et aucune lacune de sédimentation n'a été repérée entre les différents puits creusés A, B et C. Mais des difficultés ont surgi pour les autres profils de bas de pente et nous n'y avons pas retenu de profils latéraux afin d'éviter des erreurs systématiques.

Les figures B 6 et B 7 indiquent les répartitions granulométriques des sables dans les profils verticaux (A) et (C) où la dispersion des courbes est assez grande. Il faut observer que l'importance des fractions grossières à tendance à diminuer progressivement de la profondeur vers la surface. Or, ce fait a été constaté sur tous les profils quelle que soit leur position ou quelles que soient les caractéristiques des roches-mères. Bien que nous ayons vu que l'origine pouvait être d'ordre sédimentaire, la répétition de ce phénomène est à souligner. La figure B 8 compare les fractions sableuses dans les différents profils, cette fois sur un plan horizontal, sans tenir compte du pendage. La variabilité est également élevée.

Compte tenu de ces variations rapides, nous avons comparé les couples de prélèvements CA 544 - CA 463 et CA 541 - CA 460 des profils (A) et (B).

Fig. B6

VARIATION DE LA GRANULOMÉTRIE DU SQUELETTE
QUARTZEUX DANS LE PROFIL A (Casamance)

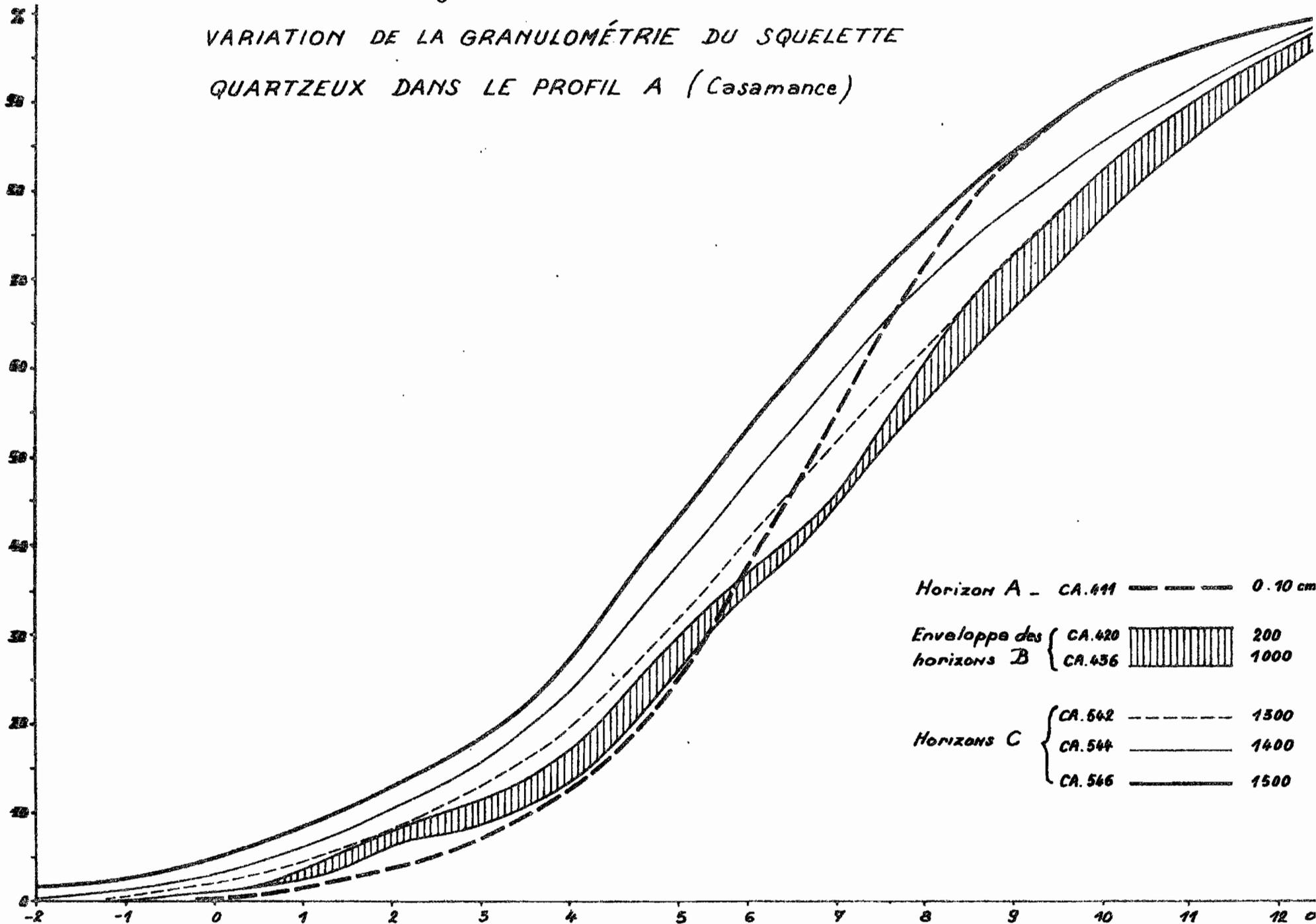


Fig. B7

VARIATION DE LA GRANULOMÉTRIE DES SABLES
DANS LE PROFIL C (TOPOSÉQUENCE DE CASAMANCE)

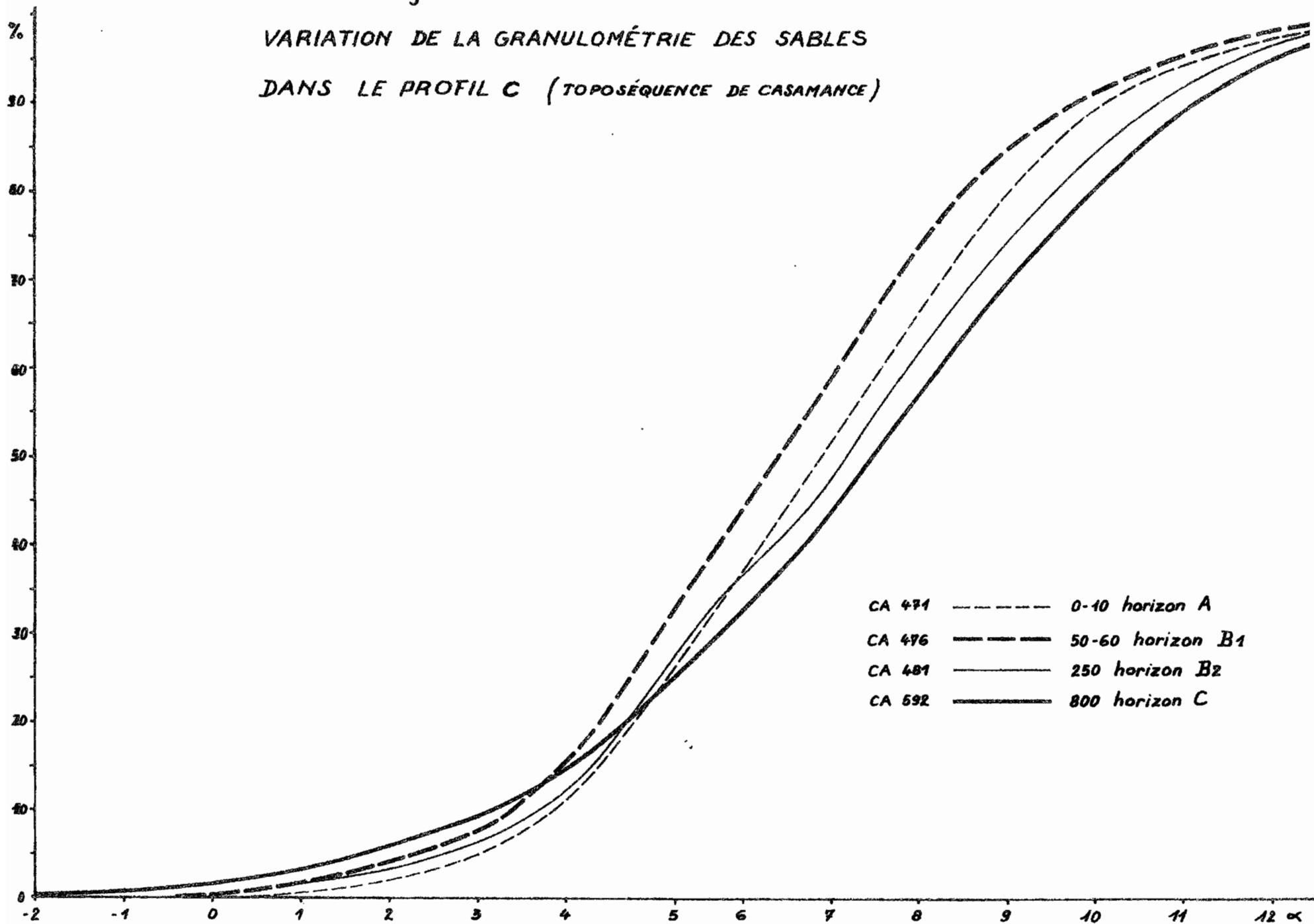
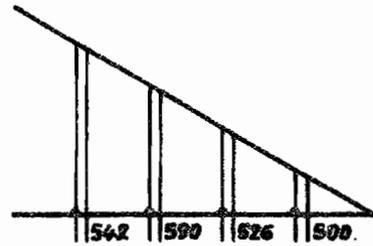
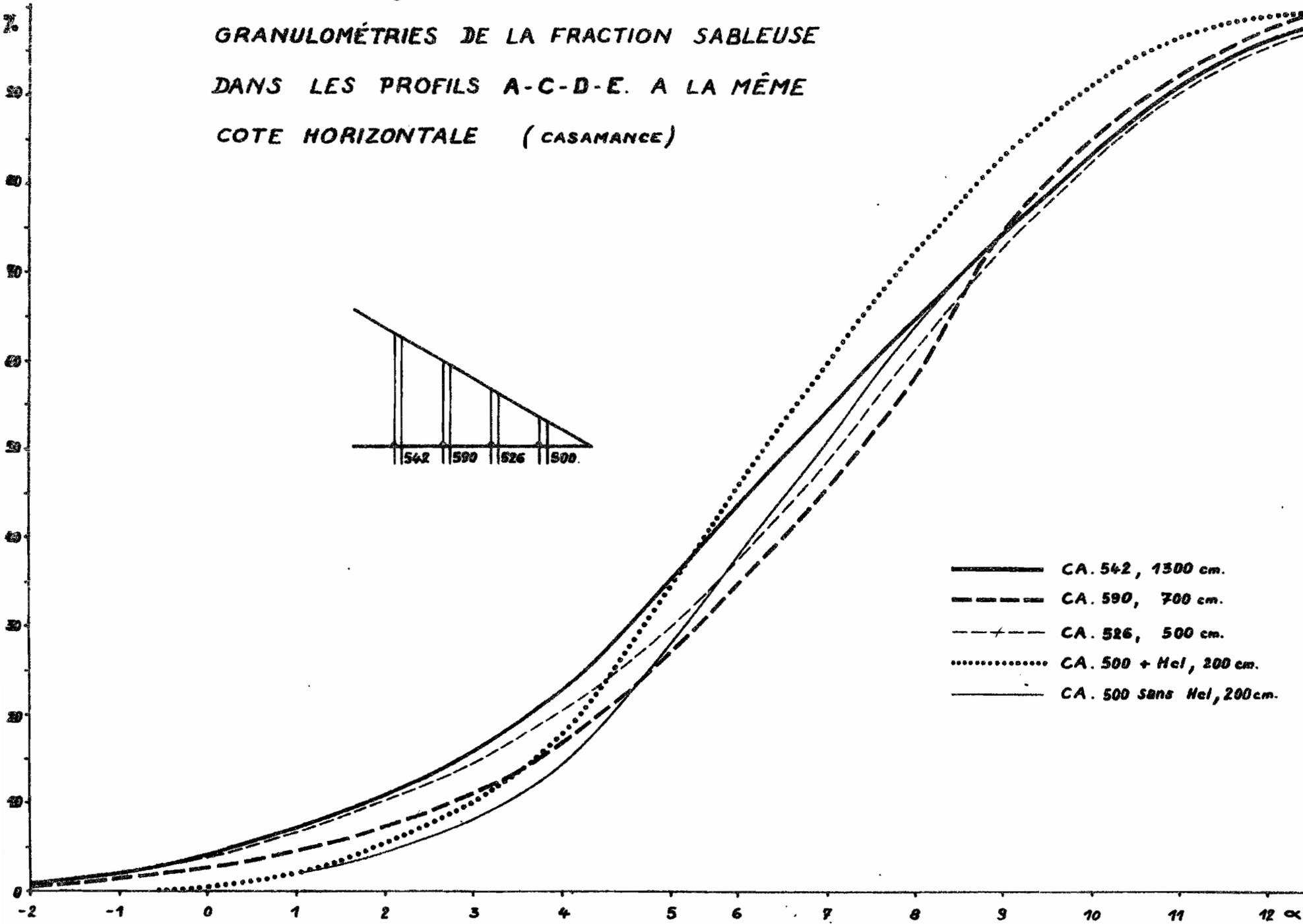


Fig. B8

GRANULOMÉTRIES DE LA FRACTION SABLEUSE
DANS LES PROFILS A-C-D-E. A LA MÊME
COTE HORIZONTALE (CASAMANCE)



- CA. 542, 1300 cm.
- - - CA. 590, 700 cm.
- / - CA. 526, 500 cm.
- CA. 500 + Hel, 200 cm.
- CA. 500 sans Hel, 200 cm.



Ces couples sont situés dans les mêmes profils latéraux, c'est-à-dire qu'il y a forte probabilité que les roches-mères aient été identiques. La figure N 9 fournit les courbes cumulées correspondantes en échelle ϕ et un tableau simplifié en sept classes granulométriques. Les courbes sont très voisines. Les faibles variations présentées sont toujours dans le même sens, confirmant la tendance à la diminution des fractions granulométriques grossières des sables en allant des roches-mères vers les horizons B des sols. Cette tendance se confirme donc tant sur le plan vertical que sur le plan sub-horizontale.

3.3 - Conclusions

La modification granulométrique est donc dans le même sens dans les deux toposéquences. Elle a peu de chances d'être due au seul régime de la sédimentation, et elle évoque donc un phénomène pédogénétique.

4) Passages latéraux d'horizons C à des horizons B

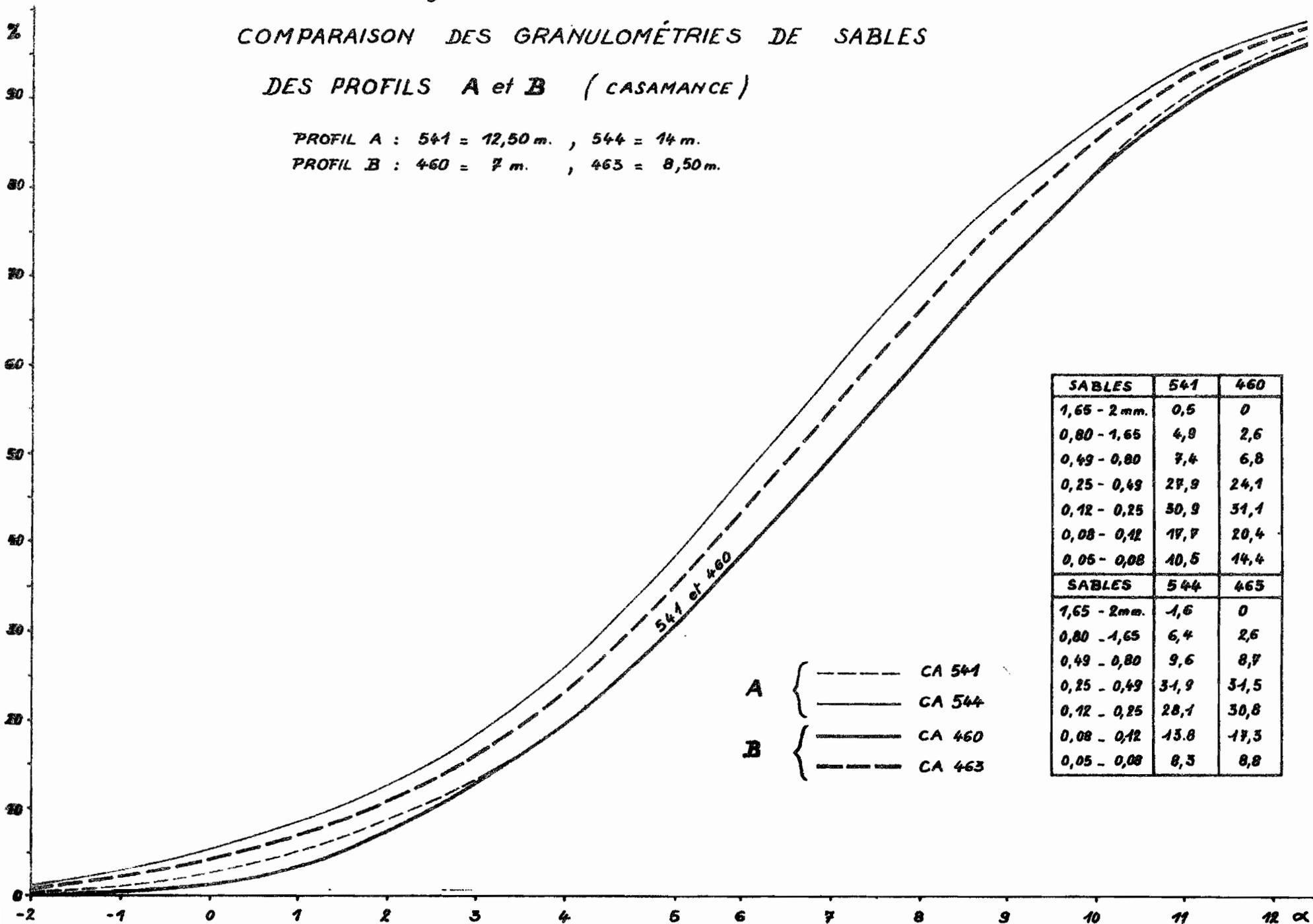
Nous rappelons que les horizons C ont été définis comme la zone de transition entre les matériaux non structurés, appelés roches-mères, et les horizons rouges homogènes, définis comme B. Dans le cas de la toposéquence de Haute-Volta, il s'agit de niveaux progressivement plus argileux qui s'enrichissent en zones argilo-sableuses rouges de plus en plus nombreuses. D'après ce qui a été vu précédemment sur la mise en place des matériaux, cette morphologie semblerait pouvoir s'expliquer par un approfondissement de l'horizon B, s'effectuant par secteurs discontinus enrichis en argile et en fer. Dans l'exemple de la toposéquence de Casamance, les horizons C sont des sables argileux colorés en rouge et en ocre jaune et contenant des fragments de grès violet de cohésion plus ou moins forte. Dans ce cas, il s'agit probablement d'un approfondissement des sols par altération d'un niveau gréseux induré, qui a pu même être oblitéré dans les profils C et E. Les granulométries de sables ont été effectuées pour vérifier ces points, et pour éliminer l'éventualité d'un changement latéral de matériau originel, soit lors du dépôt, soit par remaniement ultérieur. Mais il faut remarquer qu'en arrivant dans les horizons C, BC et B des sols, les résultats des granulométries des sables, avec et sans déferrification, ont été souvent différents.

COMPARAISON DES GRANULOMÉTRIES DE SABLES

DES PROFILS A et B (CASAMANCE)

PROFIL A : 541 = 12,50 m. , 544 = 14 m.

PROFIL B : 460 = 7 m. , 463 = 8,50 m.



4.1 - En Haute-Volta

En Haute-Volta, la comparaison a pu se faire facilement entre les profils HFA et HF 33. La figure B 10 nous indique que les granulométries des échantillons HF 335 à 338 sont très voisines, alors que celles des échantillons 339 et 3310 du même profil sont très différentes. Cette variation n'a pas été remarquée dans la description du profil sur le terrain., l'horizon B rouge étant apparemment homogène. Les variations du squelette quartzueux originel se retrouvent donc, apparemment effacées par les phénomènes d'argilification et de rubéfaction.

La correspondance latérale des matériaux originels des profils HFA et HF 33 se confirme, et la courbe granulométrique relative à HFA 14 se superpose même pratiquement à celle de HF 339. Les mêmes correspondances ont été trouvées pour les couples successifs HFA 10 et 12 et HFA 335 et 337. Cependant la représentation en ordonnée logarithmique et l'étude des répartitions de sables dans chaque classe montrent une différence dans les teneurs en fractions grossières. La répartition est plus gaussienne en ce qui concerne le numéro HF 338, ce qui est surprenant. Mais les sables grossiers diminuent toujours de l'horizon C à l'horizon B situé sur même couche sédimentaire.

4.2 - En Casamance

Pour la Casamance, nous présentons deux des comparaisons qui ont été faites. Le prélèvement CA 589 provient du profil C à 6,50 m. C'est un horizon C sablo-argileux, bariolé de rouge, ocre, blanc, avec des fragments gréseux friables. Il correspond, d'après le pendage défini plus en profondeur, au prélèvement CA 520 du profil E. Il s'agit alors d'un horizon B₂ argilo-sableux, rouge, homogène, à 2 mètres de profondeur dans le profil. La figure B 11 présente les deux courbes, qui sont sensiblement parallèles. Le tableau des pourcentages par classes démontre que les squelettes sableux sont très comparables, la classe de 0,128 à 0,250 mm étant pratiquement le dénominateur constant dans les comparaisons. Il indique également que la déferrification de l'échantillon CA 520 se traduit par une diminution sensible de l'importance des fractions les plus grossières.

Fig. B 10

COMPARAISON DES PROFILS HFA et HF 33

(Granulométrie des sables)

Correspondance latérale HFA 14 - HF 339

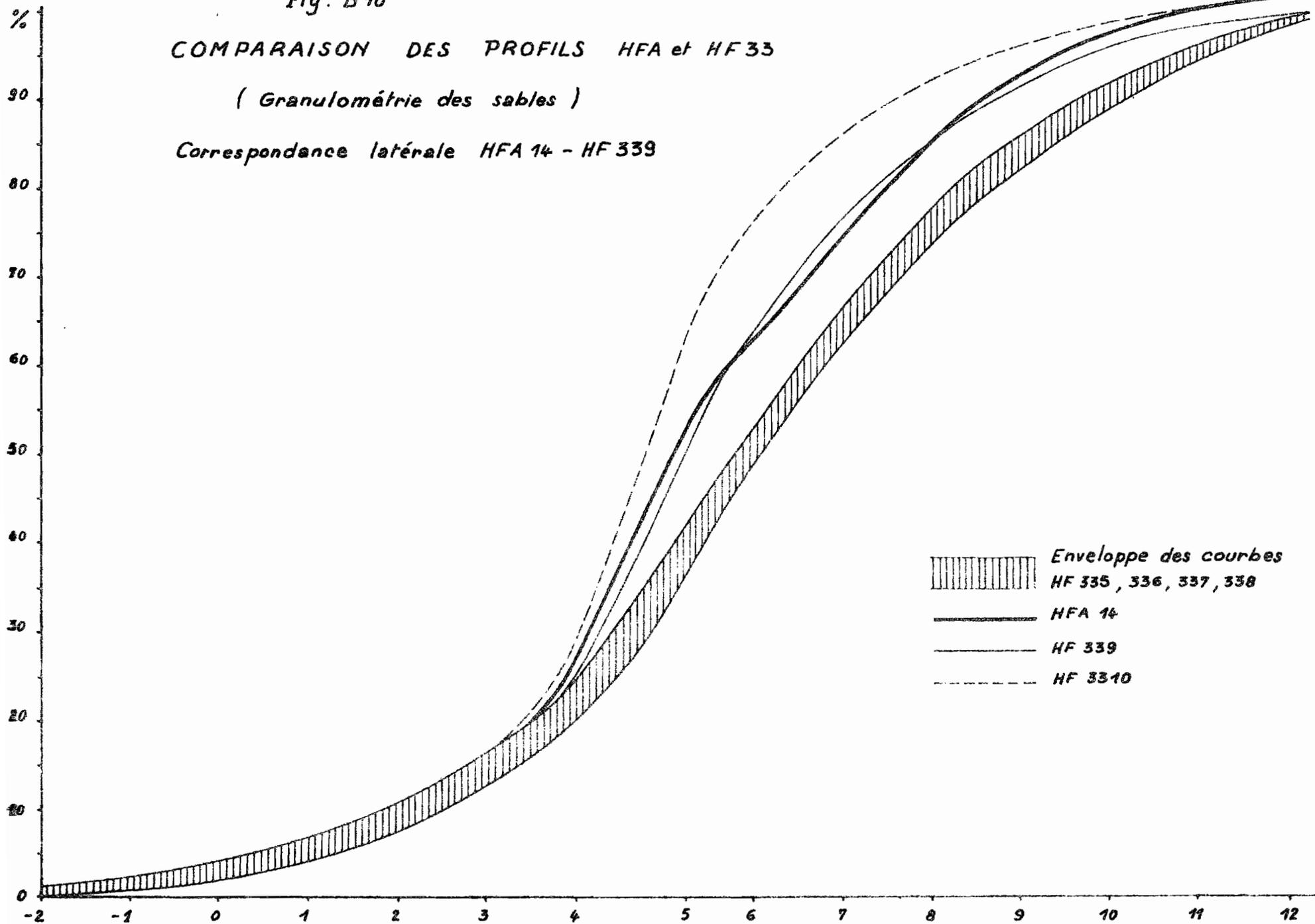
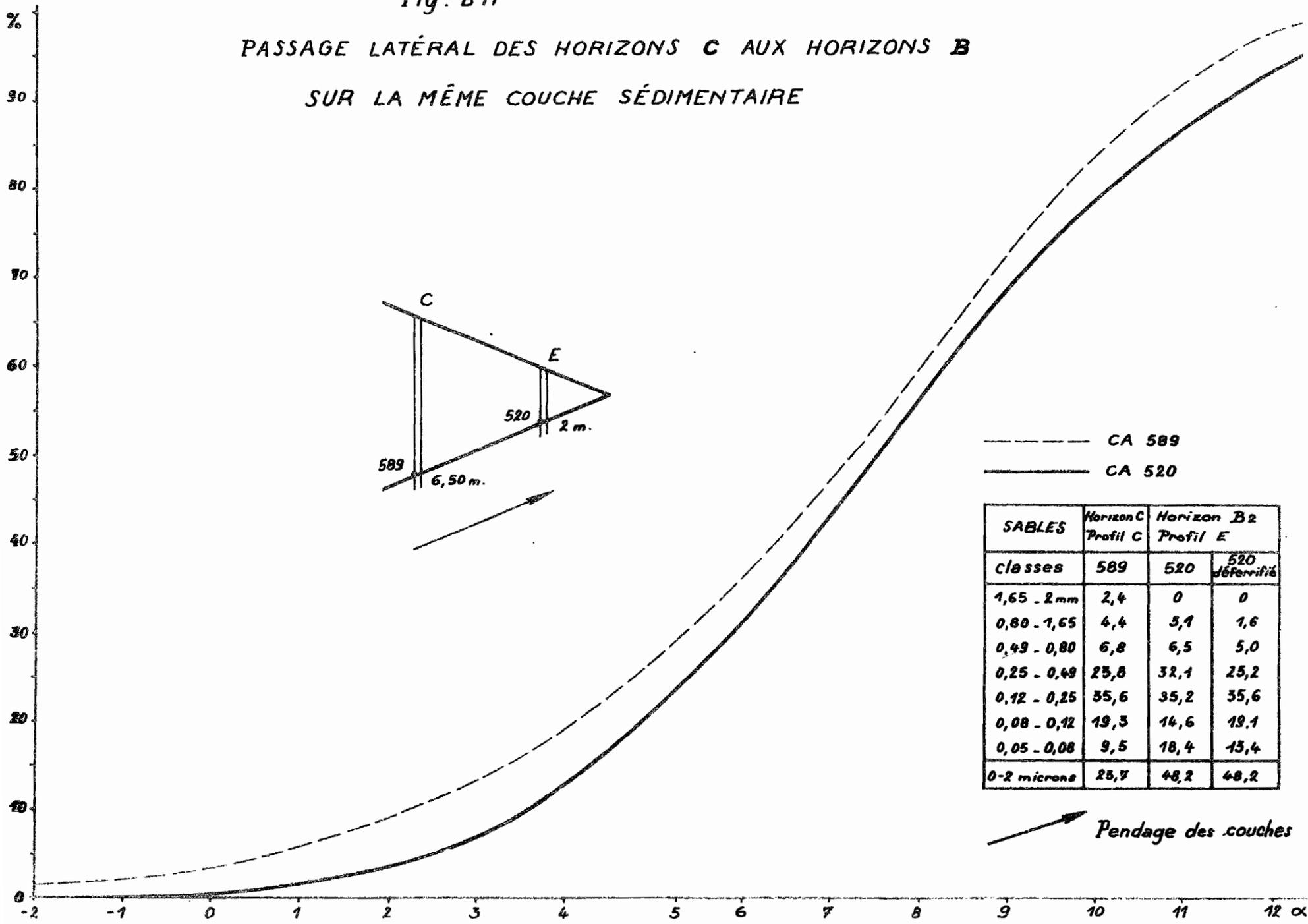


Fig. B 11

PASSAGE LATÉRAL DES HORIZONS C AUX HORIZONS B
SUR LA MÊME COUCHE SÉDIMENTAIRE



----- CA 589
 _____ CA 520

SABLES Classes	Horizon C Profil C		Horizon B2 Profil E
	589	520	520 déferrifié
1,65 - 2mm	2,4	0	0
0,80 - 1,65	4,4	3,1	1,6
0,49 - 0,80	6,8	6,5	5,0
0,25 - 0,49	25,8	32,1	25,2
0,12 - 0,25	35,6	35,2	35,6
0,08 - 0,12	19,3	14,6	19,1
0,05 - 0,08	9,5	18,4	13,4
0-2 microns	25,7	48,2	48,2

↗ Pendage des couches

Le couple CA 541 - CA 460, (qui constitue le deuxième exemple) est issu également d'un matériau dont les dépôts seraient contemporains, puisque l'on a tenu compte du pendage défini en profondeur. L'identité des courbes cumulatives (figure B 12) est surprenante : elles se recouvrent sur une grande longueur (ordonnée en échelle arithmétique, abscisses en échelle \log). Les seules différences sont un léger appauvrissement en sables grossiers et un enrichissement en sables très fins dans les horizons B₃ - C rubéfiés, par rapport aux horizons C moins argileux, bariolés et rougeâtres.

Les comparaisons 589-520 et 541-460 nous fournissent donc de nouveaux exemples de la similitude des squelettes quartzeux, alors que les autres caractères physico-chimiques sont différents. Il est probable que les matériaux originels ont été les mêmes. Il est également net que les différences de caractères chimiques sont dues à la pédogénèse. On observe toujours une tendance systématique à la diminution des fractions les plus grossières des sables en allant des horizons C aux horizons B. Il est de plus en plus probable que cette différenciation est à mettre au crédit de la pédogénèse.

5) Passages latéraux de l'horizon B à des horizons B et A

5.1 - De B vers B au Sénégal

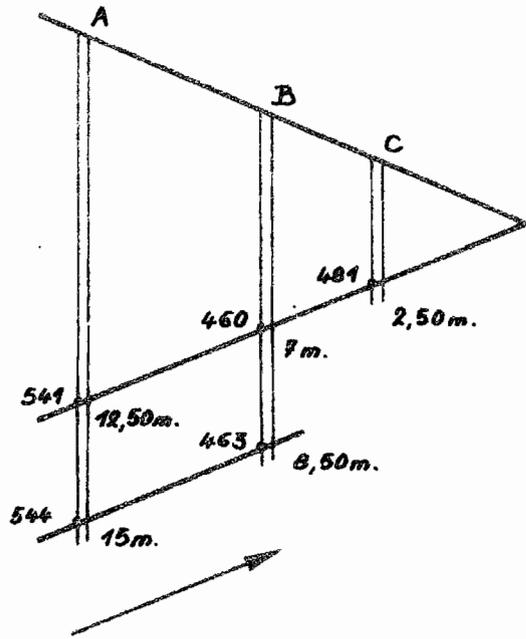
Dans le profil A de la toposéquence de Casamance, l'horizon CA 429 se trouve dans la moitié inférieure de l'horizon B à une profondeur de 6,50 m. Dans le profil B, compte tenu du pendage, l'horizon développé sur un matériau équivalent serait, théoriquement, le CA 448, à un mètre de profondeur. Ces deux horizons rubéfiés contiennent cette fois le même pourcentage d'argile granulométrique, ce qui rend la comparaison particulièrement intéressante.

La figure B 13 présente les courbes cumulatives de sables de ces deux prélèvements. Les courbes sont assez semblables, et elles se recouvrent dans la zone des sables fins. Mais elles sont décalées ailleurs, l'horizon 429 (B profond) étant plus riche en sables grossiers, l'horizon 448 (B₁-B₂) étant légèrement plus riche en fractions fines. Le tableau chiffré qui complète les courbes concerne, comme ces dernières, les tamisages après défermentation. Il indique qu'il y aurait une diminution de 8,4 à 6,2 % de la

Fig. B 12

COMPARAISON "LATÉRALE" DES GRANULOMÉTRIES

DE SABLES : horizons des profils A, B et C



- | | | | | |
|--|---|----------|-------|------------------|
| Matériaux
"homologues"
dans les sols | { | Profil A | ----- | N° 541 - 12,50m. |
| | | Profil B | ————— | " 460 - 7m. |
| | | Profil C | ..... | " 481 - 2,50m. |
| Matériaux
de profondeur | { | Profil A | ————— | " 544 - 15m. |
| | | Profil B | ----- | " 463 - 8,50m. |

↗ Pente des couches

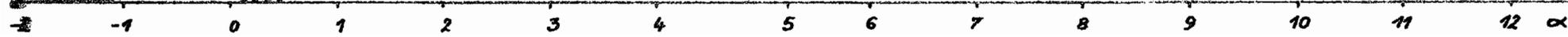
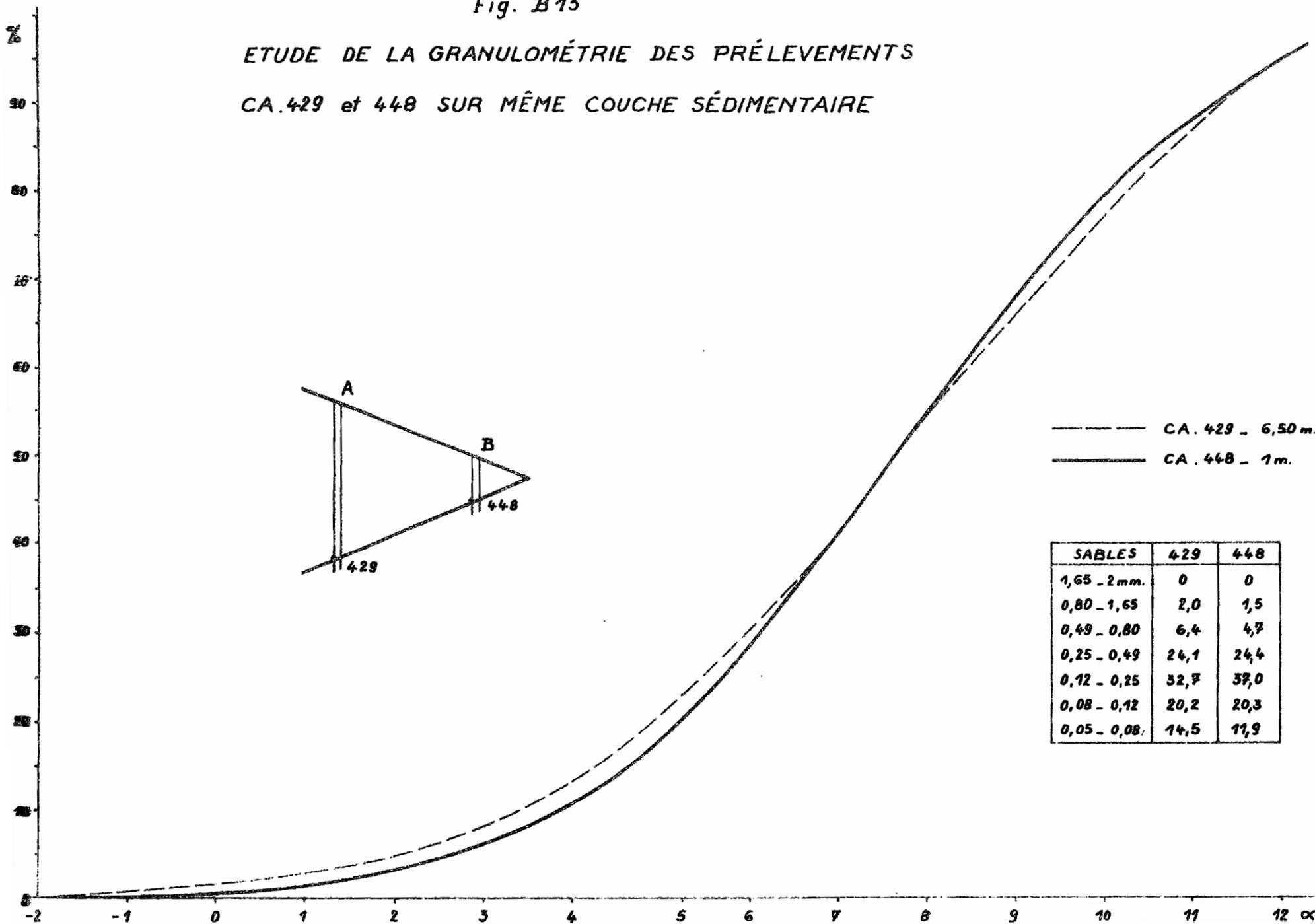


Fig. B 13

ETUDE DE LA GRANULOMÉTRIE DES PRÉLEVEMENTS
CA. 429 et 448 SUR MÊME COUCHE SÉDIMENTAIRE



fraction de taille supérieure à 0,50 mm ; cette diminution faible en valeur absolue est cependant relativement élevée en valeur relative. Elle est à rapprocher des résultats obtenus plus en profondeur.

5.2 - De B vers A au Sénégal

La transition de B vers A a été étudiée, d'une façon comparative, sur profil vertical et sur profil latéral. En premier lieu nous avons défini sur chaque profil le passage de l'horizon B à l'horizon A, en utilisant des prélèvements très serrés (de 10 cm en 10 cm). En second lieu, nous avons utilisé la méthode des profils latéraux pour assurer l'équivalence des matériaux originels.

Les résultats concernant les profils A et C sont présentés dans le tableau n° B 4. Les horizons superficiels du profil C sont étudiés 10 cm x 10 cm. En principe, les comparaisons sur le plan vertical sont délicates car la roche-mère de chaque horizon successif n'était pas forcément la même malgré la faible distance linéaire. De plus, la probabilité de remaniements superficiels devient plus grande lorsqu'on se rapproche de la surface. Cependant, sur chacun des quatre profils A, B, C, E de la toposéquence Casamance, il est remarquable d'observer une variation très progressive, quoique rapide, des caractéristiques granulométriques des sables. Les remaniements ont probablement été nuls ou très discrets, en haut de pente, Mais il est remarquable que les divers prélèvements de surface (0 - 10 cm) présentent des granulométries extrêmement voisines, bien que les matériaux aient été assez différents d'après ce que nous avons vu précédemment (cf. figure B 14). L'origine peut être d'ordre pédologique mais elle peut s'expliquer aussi par des recouvrements.

Le tableau n° B 5 ci-après résume la comparaison de divers échantillons de surface avec les trois échantillons de profondeur qui, sur le plan de la roche-mère dans d'autres profils adjacents sont leurs homologues latéraux.

TABLEAU N° B 4 - : GRANULOMETRIES DES SABLES: TOPOSEQUENCE DE CASAMANCE -

PROFIL A	CA 546	CA 541	CA 436	CA 429	CA 424	CA 420	CA 411				
HORIZONS	Matériaux	C	B 3	B 2	B 2	B 2	A				
Profondeur cm	1500	1250	1000	650	400	200	0-10				
2,0 - 1,65	2,1	0,6	0	0	0	0,1	0				
1,65 - 0,80	6,4	6,4	3,7	2,0	2,4	2,3	1,1				
0,80 - 0,49	10,4	7,6	7,8	6,4	7,9	6,4	5,2				
0,49 - 0,25	37,2	31,9	25,6	24,1	28,3	25,6	32,4				
0,25 - 0,128	27,5	28,1	30,8	32,7	33,3	36,6	44,8				
0,128- 0,080	12,0	13,8	18,5	20,2	16,7	18,2	12,2				
0,080- 0,005	5,6	8,3	13,6	14,5	11,3	10,7	4,2				
PROFIL C	CA 481	CA 481	CA 478	CA 476	CA 475	CA 473	CA 472	CA 471			
HORIZONS	B 2	B 2	B 2	B 1	AB	AB	A2	A1			
Profondeur cm	250	200	100	50 - 60	40-50	20-30	10-20	0 - 10			
	Sans	Avec			Sans	Avec			Sans	Avec	
2,0 - 1,65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1,65 - 0,80	1,9	1,5	2,4	1,9	1,6	1,1	0,6	0,9	0,9	0,7	0,8
0,80 - 0,49	7,1	5,4	8,5	7,7	7,3	6,1	6,3	5,2	9,1	4,8	4,4
0,49 - 0,25	31,4	26,1	33,8	36,1	36,9	37,2	35,8	34,6	33,6	33,6	33,5
0,25 - 0,128	37,1	36,3	37,1	35,6	37,0	37,5	40,4	41,5	42,6	41,4	42,3
0,128- 0,080	15,6	14,8	16,2	13,8	13,4	13,2	12,9	14,2	14,5	14,7	11,6
0,080- 0,005	6,9	10,9	4,7	3,6	3,7	4,8	3,3	3,7	3,4	4,5	4,3
Limon grossier			5,7	5,3	3,4	3,4	4,4	5,3	4,7	5,4	5,4
Limon fin		5,6	3,3	2,5	1,5	1,5	2,0	2,5	2,2	3,2	3,2
Argile		42,2	37,4	39,1	35,4	35,4	31,4	11,4	10,4	9,7	9,7

Sans { déferrification.
Avec {

Fig. B 14

GRANULOMÉTRIES DE SABLES DES ECHANTILLONS
DE SURFACE (Profils de CASAMANCE)

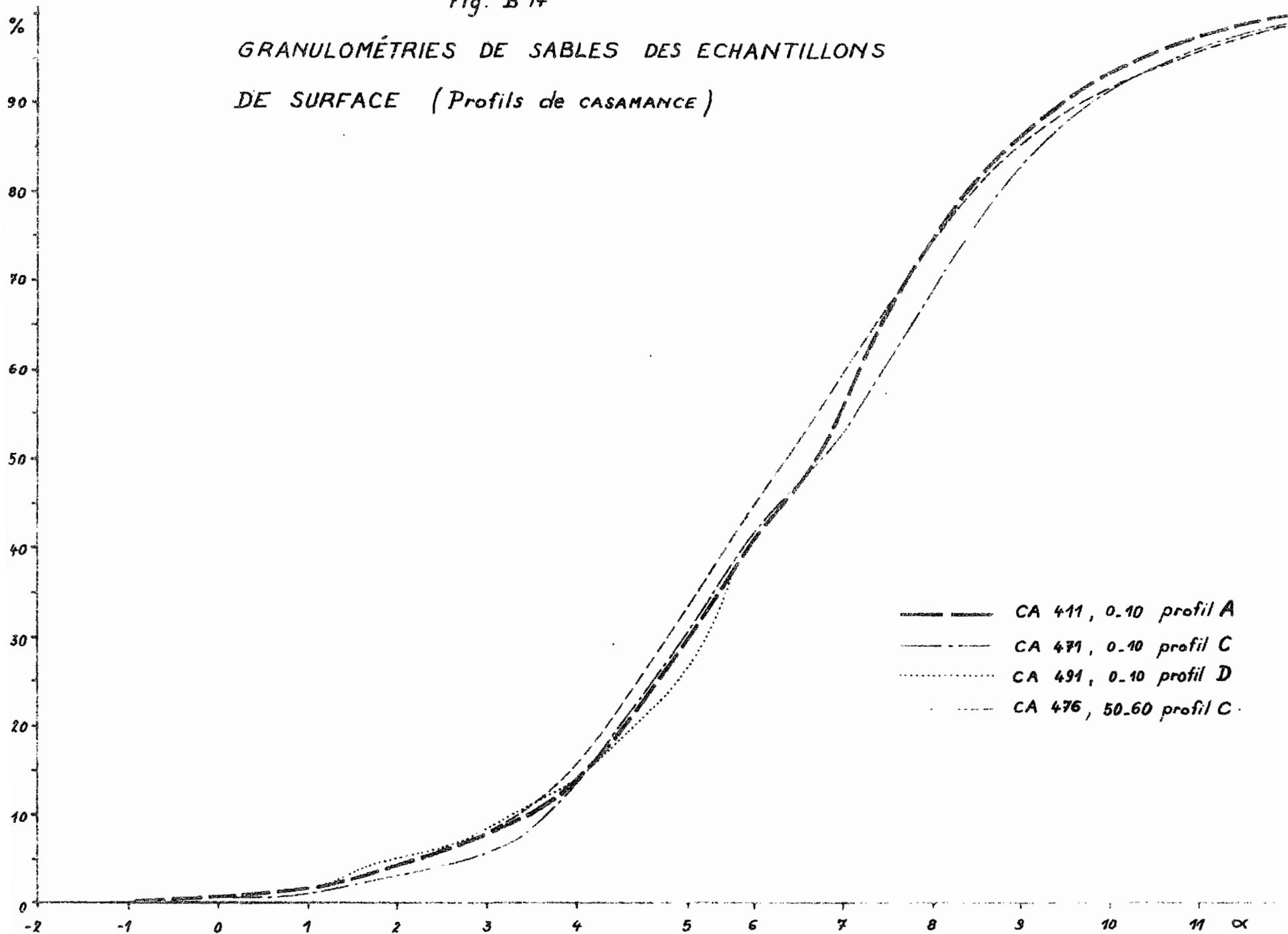


TABLEAU n° B 5 - Granulométries des sables des horizons de surface et de leurs homologues.

	CA	411	441	471	491
Prélèvements de surface des quatre profils : A-B-C-E	1,65 - 2 mm	0	0	0	0
	0,80 - 1,65	1,1	1,0	0,7	0,9
	0,49 - 0,80	5,2	4,9	4,4	5,2
	0,25 - 0,49	32,4	31,4	33,0	35,1
	0,12 - 0,25	44,8	42,0	43,6	43,4
	0,08 - 0,12	12,2	14,7	13,4	11,5
	0,05 - 0,08	4,2	5,7	4,8	3,6
Prélèvements de profondeur à matériau équivalent sur profil voisin.	1,65 - 2 mm		0	0	0
	0,80 - 1,65		2,2	3,2	5,8
	0,49 - 0,80		7,1	5,2	8,0
	0,25 - 0,49		26,2	23,0	23,9
	0,12 - 0,25		33,0	32,7	33,2
	0,05 - 0,08		12,9	14,0	10,3

Les répartitions granulométriques de sables, très différentes entre surface et profondeur pourraient faire penser à l'action de mécanismes d'érosion ou de remaniement. Cependant, dans chacun des profils, la progressivité des variations sur le plan vertical, sans vraie discontinuité, nous fait plutôt envisager un mécanisme pédogénétique. Dans un seul profil, (C), il y a une variation rapide, mais sans vraie discontinuité qui a été notée à 50 cm. de profondeur.

Dans cette hypothèse, que ce soit dans un plan vertical pour chacun des puits, ou dans des profils latéraux, deux résultats s'imposeraient :

- le phénomène de diminution de la fraction la plus grossière, phénomène suivi depuis l'horizon C, se poursuit dans les horizons A.
- un autre phénomène apparaît, nouveau, la diminution relative de la fraction de sables très fins.

Cette progressivité systématique des variations, dans tous les profils verticaux, nous a incité à comparer les horizons de surface et les horizons de profondeur, non seulement en pourcentages, mais en ramenant tous les chiffres à un poids constant de la fraction de sables moyens, 0,250 - 0,128 mm. Ce mode de calcul nous semble possible compte tenu de l'importance relative, en poids, de cette dernière fraction, et de la constance remarquable qu'elle a dans tous les profils. En procédant de cette façon, les phénomènes précédents sont encore accentués. Les sables grossiers diminuent de moitié dans les horizons supérieurs par rapport aux teneurs dans les niveaux à matériaux originels comparables. Quant aux fractions fines, de 0,050 à 0,0125 mm, elles diminuent également comme le montre le tableau B 6. Le prélèvement CA 471 y est comparé, d'une part au CA 455, homologue latéral de profondeur pour le matériau originel, d'autre part aux CA 476 et 481 qui lui succèdent verticalement dans le même profil.

TABLEAU N° B 6 - Granulométries des sables de l'échantillon 471 et des prélèvements qui lui sont comparés.

	Profil B	Profil C		
Echantillons	455 +	471 +	476 +	481 +
Profondeurs cm.	450	0 - 10	50-60	250
2,0 - 1,65	0	0	0	0
1,65 - 0,80	3,9	0,7	1,2	1,6
0,80 - 0,50	6,5	4,2	6,1	6,0
0,50 - 0,25	23,0	31,0	33,9	28,8
0,25 - 0,128	40,0	40,0	40,0	40,0
0,128 - 0,010	28,0	12,6	19,3	21,8
0,010 - 0,005	17,0	4,5	8,9	12,0
+ avec déferrification				

Rappelons que tout le raisonnement est établi en étudiant les granulométries avec et sans déferrification, mais il faut noter que les deux séries de résultats sont presque identiques dans les horizons de surface, soit de 0 à 50 cm environ.

5.3 - Conclusion

L'étude des profils de Haute-Volta (comme HF 32, HF 33 et HF 37) nous a confirmé généralement les observations précédentes. Dans les cas où l'analyse a fourni des répartitions de sables non concordantes, d'autres observations morphologiques donnent à penser que des phénomènes de remaniement superficiel ont pu se produire. C'est le cas des profils HFA, et HFB en particulier pour les horizons de 0 à 20 cm. C'est pour cela que la toposéquence n'a pas été retenue pour l'étude des horizons supérieurs.

En définitive, le phénomène d'une diminution des fractions les plus fines des sables a été vérifié tant dans les plans verticaux que dans les plans "latéraux". Il apparaît surtout, ou du moins s'accélère, à une profondeur comprise entre 50 et 80 cm selon les profils. Il est remarquable qu'il apparaît approximativement à une profondeur où l'a pauvrissement en argile granulométrique devient un fait essentiel. Nous verrons plus loin qu'il s'agit également de l'horizon de sol où des acides fulviques sont accumulés. Cette diminution des sables très fins, de 50 à 100 microns, n'a pas été remarquée en profondeur. Au contraire, dans la plupart des cas, il y a même augmentation régulière de cette fraction entre les roches-mères et l'horizon B. Au bilan, dans les horizons supérieurs, la modification de la granulométrie des sables, dans les fractions grossières comme dans les plus fines, se traduit finalement par une augmentation relative en sables moyens.

6) Conclusions sur les données granulométriques des sables

L'ensemble des observations qui précède a surtout été obtenu par l'étude des profils latéraux. Les résultats nous amènent logiquement à conclure à une modification de la granulométrie du squelette sableux par un mécanisme pédogénétique. Ce phénomène affecte tout le profil, depuis les matériaux originels jusqu'aux horizons organiques. Il se caractérise surtout par une diminution rapide, en valeur relative, de la fraction des sables grossiers, dans les horizons B et les horizons appauvris. Mais il y a également une diminution de la teneur en sables très fins dans les horizons supérieurs. Le fait y est cependant moins évident compte tenu de l'existence de remaniements, soit par érosion, soit par homogénéisation d'ordre biologique.

Dans l'interprétation des résultats d'analyses granulométriques, nous avons tenu compte des limites de confiance des méthodes employées : les tamisages ont une précision limitée, et les déferrifications peuvent avoir un effet destructeur sur la stabilité des sables. Cependant, les conclusions avancées sont rendues plausibles par la généralisation des résultats. Ces derniers sont toujours dans le même sens sur les nombreux autres profils isolés, étudiés tant au Sénégal qu'en Haute-Volta.

Pour confirmer ces interprétations, nous avons effectué un certain nombre d'observations par les méthodes optiques. En particulier, un profil a été étudié dans son entier par les méthodes micromorphologiques. Au préalable ces techniques ont été utilisées pour vérifier la réalité d'un fractionnement des sables ; ensuite, elles l'ont été pour définir si ce fractionnement est accompagné ou non d'une perte de substance. Cette dernière hypothèse est en effet suggérée par la diminution des teneurs en sables fins. Leur disparition indique qu'il y a peut-être diminution de taille dans toutes les fractions granulométriques et pas seulement dans certaines d'entre elles.

C - EXAMENS MORPHOLOGIQUES ET MICROMORPHOLOGIQUES

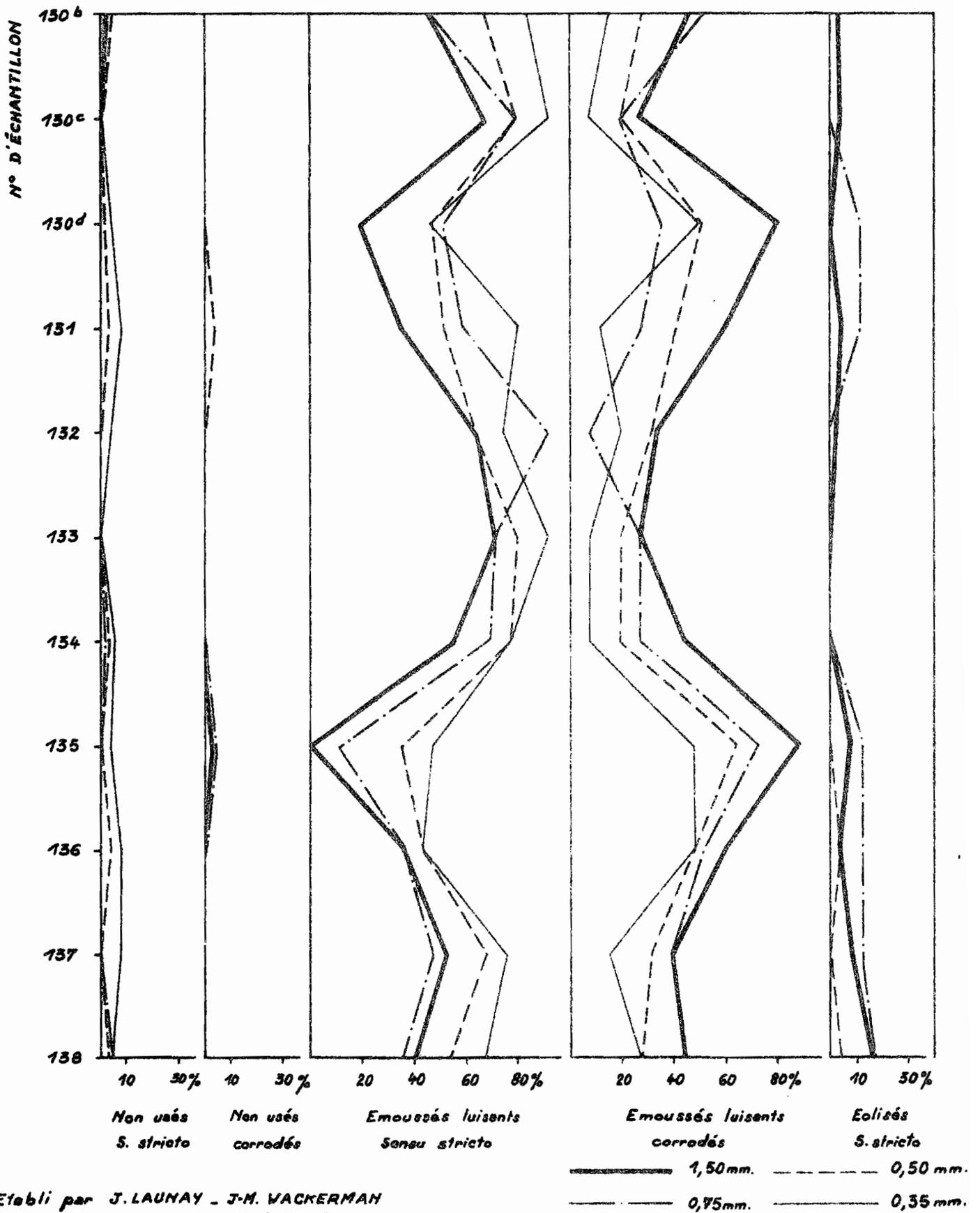
1) Etude morphologique des sables

1.1 - Les observations

De nombreux examens de sables au binoculaire ont été effectués. Ils ont d'abord permis de caractériser les matériaux originels : grès cambriens et continentaux terminaux du Sénégal et du Dahomey (cf. 1ère partie). Ils ont également fourni des indications intéressantes sur les profils de sols.

LAUNAY et WAKERMANN (1964) ont étudié plusieurs de nos puits de Casamance, en particulier les profils CA 11 et CA 13. La figure B 15 fournit les résultats de l'étude morphoscopique du profil CA 13). Leurs observations essentielles sont les suivantes : dans les classes granulométriques grossières, on peut noter la présence d'agrégats de petits grains de quartz ; parfois il y a des globules d'origine secondaire, cimentés par de la silice, mélangée ou

ETUDE DES SABLES : PROFIL CA 15 (BIGNONA, CASAMANCE)



non avec de la kaolinite, et entourés par des oxydes de fer. La corrosion chimique semble en relation étroite avec la présence de fer. Elle est marquée, dans un premier stade, par des sillons ou des figures rhombiques à la surface des grains. Dans un stade plus avancé, elle se traduit par l'ouverture de clivages, de fissures, envahis par les oxydes de fer. Le dernier stade est l'imprégnation de la matrice cristallisée par les oxydes de fer, précédant la pulvérisation des grains. Cette corrosion, bien marquée sur les gros grains, voit son importance décroître vers les petites tailles, indiquant d'après WAKERMANN et LAUNAY une plus grande perfection du réseau des cristaux de petite taille dans la roche d'origine.

L'examen systématique que nous avons effectué, ultérieurement, sur les prélèvements dans les deux toposéquences, ont confirmé ces observations. La présence de pseudo-sables, qui ont résisté à la dispersion effectuée lors de l'analyse mécanique, est constante dans les horizons rubéfiés. Seule l'attaque HCL des sables les détruit, et c'est ce qui explique les différences constatées dans l'étude granulométrique avec et sans déferrification. Ces pseudo-sables sont donc des "éléments de néoformation de la granulométrie" (LEVEQUE, 1966), qui n'existent pas dans les matériaux originels sableux blancs, comme ceux des puits de Haute-Volta. Par contre, ils existent dans certains niveaux gréseux qui sont en cours d'altération sous les sols. Dans ce dernier cas, ils peuvent donc représenter un héritage pour le profil pédologique. Leur importance quantitative, leur rôle, et le fait que tous les auteurs les ont signalé dans les descriptions de profils, ont justifié à nos yeux une étude particulière (cf. chapitre suivant).

La présence de quartz craquelés et imprégnés d'oxydes de fer est également systématique. Les photos en couleur de la planche P 1 présentent quelques-uns des faciès inventoriés. On y remarque la progressivité de l'accumulation du fer autour des cristaux, puis sa pénétration, enfin l'aspect de plus en plus craquelé des quartz, en allant des horizons C aux horizons B. Il est logique de rapprocher ces phénomènes des résultats précédents concernant la modification de la taille des quartz par la pédogénèse.

Enfin l'examen des horizons HFA 19 et HFA 22, horizons C où le sol s'approfondit, indique que la phase rubéfiée diffère sensiblement de la phase sableuse blanche. Cette phase rubéfiée contient de nombreux petits agrégats de sables moyens regroupés par un plasma argileux, et des quartz grossiers, violets, craquelés, avec des imprégnations de fer. Rappelons qu'elle présentait également une diminution de la fraction de sables grossiers.

1.2 - Les interprétations

Les modifications de la taille des quartz, et en particulier la diminution de la fraction grossière dans les horizons C, semblent donc être en relation étroite avec l'importation et l'infiltration d'hydroxydes de fer. Cette infiltration se traduira peu à peu par un envahissement complet de l'horizon, donnant une matrice rouge. Nous étudierons plus loin le mécanisme de la rubéfaction, mais il apparaît déjà qu'il ne s'agit pas d'un simple phénomène de coloration.

D'autre part, la généralisation de l'éclatement des quartz en présence de fer fait penser que la modification de la granulométrie des sables pourrait bien affecter l'ensemble des classes granulométriques. Un tel phénomène, d'intensité variable selon les classes, se traduirait, en définitive, par une diminution possible de la masse globale des sables. Cela ne se conçoit que par un départ de substance. Ce dernier ne peut être évidemment que de la silice libérée par dissolution ou sous forme de particules très fines, de la taille des argiles.

L'importance de ces conclusions sur le plan de la pédogénèse nous a incité à effectuer sur un profil complet une étude à l'échelle micromorphologique, afin de mieux définir les relations entre les squelettes quartzeux et les autres éléments du sol.

2) Etude micromorphologique d'un profil

Le profil retenu est le profil HFA de Haute-Volta, sur lequel des plaques minces ont été réalisées et interprétées par PEREIRA-BARRETO (non

publié). Les termes sont des traductions de ceux utilisés par BREWER (1964). L'ensemble des observations est présenté par caractère micromorphologique : squelette, plasma, etc.....

2.1 - Squelette

Dans l'horizon C, les quartz sont uniformément répartis, avec les plus gros grains (600 à 1.000 μ) fortement fissurés. Dans la zone de passage du matériau au sol, on note une attaque des quartz dont certains ont un aspect laiteux le long des fissures, ce qui est un indice possible de leur désorganisation. Peu à peu, les hydroxydes de fer forment un liseré autour de nombreux grains de quartz, et on note un début d'infiltration dans les fissures.

Dans les horizons B, les points essentiels sont la diminution relative du squelette par rapport au plasma, et le fait que les quartz grossiers, souvent éclatés, ont leurs fissures remplies d'oxydes de fer plus ou moins bi-réfringents.. Les formes arrondies et subarrondies deviennent nettement dominantes, tandis que le pourcentage relatif de quartz de grande taille (600 - 1.000 μ) diminue nettement.

2.2 - Plasma

En ce qui concerne le plasma, inexistant dans l'horizon C, le point essentiel est l'apparition progressive d'amas argilo-ferrugineux ou plus rarement ferriques, étendus et isolés dans les espaces intergranulaires, et incluant certains grains du squelette. Dès l'horizon BC, les secteurs du plasma ont la couleur rouge caractéristique qu'ils garderont dans tout le profil. Très rapidement, des séparations plasmiques s'individualisent sous forme de taches et surtout de traînées et de stries, en deux directions très grossièrement orthogonales. Dès l'horizon de transition B-C, on note une tendance à une redistribution des premières zones de fortes concentrations plasmiques dans des vides et autour de certains grains du squelette. Egalement, on peut observer les premières concentrations plasmiques sous forme de nodules d'oxyhydrate de fer plus ou moins individualisés, de forme arrondie. Dans les horizons B du profil, le plasma, très bien représenté, devient dominant par rapport

au squelette. Les séparations plasmiques en directions orthogonales se disposent autour de la plupart des grains du squelette. Les nodules de concentration plasmique sont de couleur plus foncée, de formes généralement irrégulières, et montrent différents degrés de bi-réfringence. Les plus rouges, qui semblent les plus cristallisés, sont très bien individualisés et présentent une limite franche et bien tranchée.

Dans la partie supérieure du profil, les séparations plasmiques assez abondantes, bi-réfringentes en rouge ou jaune clair selon l'intensité de la couleur du plasma, délimitent parfois dans la masse plasmique des micro-agrégats plus ou moins arrondis. Dans l'horizon B₁, moins argileux, le plasma présente par endroits des zones jaunâtres, les séparations plasmiques ayant tendance à souligner le contour des micro-agrégats et de certains nodules ferrugineux. Une des directions orthogonales semble devenir privilégiée, et les nodules d'oxyhydrates de fer sont assez bien délimités.

2.3 - Autres caractères morphologiques

Ils sont moins importants, mais il faut noter que des traces de matière organique apparaissent dès le prélèvement HFA 19 (8 mètres) sous forme de petits amas brun-noir dans les premières masses plasmiques. Dans tout le profil, les vides sont essentiellement des cavités avec de rares fissures. Enfin, les "pédoreliques" apparaissent dès l'horizon B₃ sous forme de grains de quartz fissurés, avec remplissage d'oxydes de fer très rouge, et ils se conservent, peu nombreux, jusque dans les horizons supérieurs (HFA 5).

2.4 - Interprétations

La prudence s'impose dans l'interprétation, compte tenu du nombre limité de lames qu'il est possible de faire par horizon. Cependant, les observations sont très homogènes, malgré les variations de la composition du matériau originel décelées précédemment. Il devient alors possible d'admettre une unité d'évolution, que l'on peut schématiser ainsi :

- Une première étape concerne la tendance à l'éclatement des gros grains de quartz, suivi de la pénétration progressive d'oxyde de fer dans les

fissures. Cette pénétration, jointe probablement à des effets de cristallisation, accélère un processus de fragmentation des sables qui semble se prolonger dans les horizons B. Cette possibilité de fragmentation des quartz avait déjà été signalée (CHAUVEL et PEDRO, 1967), consécutive à la dissolution, par voie chimique, des oxydes de fer incrustés dans les micro-fissures d'un certain nombre de particules élémentaires sableuses.

- Une seconde étape de l'évolution représente la mise en place d'amas de plasma, dont la couleur rouge semble immédiatement définitive. L'envahissement de la matrice par ce plasma explique l'augmentation de coloration du profil, et la texture progressivement plus argileuse des horizons B. Ce plasma tend, vers le haut des profils, à se concentrer par secteurs, à former des micronodules de fer plus ou moins cristallisés, et une organisation nette en directions orthogonales s'impose très rapidement. Ce plasma devient très vite dominant par rapport aux quartz, qui apparaissent moins nombreux.

Dans les horizons supérieurs enfin, on note une tendance à l'apparition de secteurs plus clairs, en rapport avec une diminution relative de l'importance du plasma. Cette tendance pourrait être la première manifestation à l'échelon de la micro-structure, d'une évolution vers une certaine déferri-fication, ou du moins vers une réorganisation du fer. A l'échelle macroscopique, le stade final de cette réorganisation pourrait être le concrétionnement caractéristique de certains sols ferrugineux tropicaux "associés" aux sols rouges.

D - LES CONCLUSIONS DU CHAPITRE IV

1) Les méthodes

L'étude granulométrique des sables de roches-mères sablo-argileuses et gréseuses, a démontré la réalité et l'importance de leur hétérogénéité. Compte-tenu de cette dernière, il s'avère que l'étude d'un bilan sur un seul profil est impossible, et que seul l'examen d'une séquence de sols peut permettre une approche du problème. Mais cela suppose qu'on a pu établir la

correspondance latérale des matériaux originels. Dans le cas des deux toposéquences retenues, cette correspondance a été établie essentiellement à partir des squelettes quartzeux ; les résultats semblent satisfaisants pour des sables comme ceux de Haute-Volta, et tout à fait plausibles pour des matériaux grésifiés comme ceux de Casamance.

La méthode des profils latéraux nous semble donc pouvoir être retenue, parmi d'autres, dans tous les cas où il s'agit de matériaux sédimentaires simples, sans ou avec très peu de minéraux altérables, comme ceux formés de quartz, d'hydroxydes de fer et d'argile minéralogique uniquement kaolinitique. Notons de suite que ces matériaux peuvent comprendre, non seulement les sables argileux des Continentaux terminaux, ou des épandages azoïques d'origine continentale, mais aussi la plupart des grès d'origine variée des régions tropicales. Cette composition théorique correspond enfin à celle de nombreux altérites et sols ferrallitiques en place ou remaniés.

L'application de cette technique aux deux toposéquences choisies a été faite avec toute la prudence nécessaire, compte tenu de la valeur des méthodes analytiques. En particulier, l'importance de l'éclatement artificiel des quartz lors de la déferrification n'a pas été négligée. La méthode a permis de dégager un certain nombre d'observations, puis d'interprétations. Mais ces dernières n'ont été définitivement retenues que parce que les observations se retrouvaient dans le même sens dans un nombre suffisant de répétitions.

2) Les interprétations et les conclusions à retenir

Les interprétations et les conclusions de l'étude sont les suivantes :

- a) l'hétérogénéité initiale des roches-mères se retrouve partiellement dans les profils, généralement masquée par les phénomènes d'enrichissement en argile et de rubéfaction.

b) les mécanismes de la pédogénèse transforment le squelette sableux :

- par diminution relative de la fraction des sables grossiers dans l'ensemble du profil. Cette diminution est très significative dans les horizons C de passage des roches-mères au sol rubéfié, moins nette dans les horizons B épais, et à nouveau notable dans les horizons supérieurs "appauvris".
- par modification des teneurs en sables très fins, de taille comprise entre 50 et 100 microns, avec tendance à l'augmentation relative dans les horizons C et B, mais diminution nette et rapide dans les horizons appauvris.

La modification de la granulométrie des sables quartzeux se traduit, en définitive, par un enrichissement relatif en sables moyens, catégorie que l'on pourrait peut-être prendre comme "invariant relatif" dans l'établissement de bilans comparatifs.

c) la modification de la granulométrie est en rapport avec trois traits morphologiques :

- l'importation du fer dans les horizons C,
- l'argilification progressive des horizons B,
- l'appauvrissement des horizons supérieurs en argile granulométrique.

L'importation du fer a été mise en relation avec la désagrégation des quartz. La pénétration du fer dans ces derniers se réalise dans des fissures et dans des canalicules. L'ensemble présente des aspects de caries qui suggèrent une désorganisation avec perte de substance. La transformation du squelette se traduirait alors par une perte de silice, perte qui débiterait dans les matériaux eux-mêmes. Ce n'est pour l'instant qu'une hypothèse.

L'argilification du fer a été mise en relation avec la désagrégation des quartz. La pénétration du fer dans ces derniers se réalise dans des fissures et dans des canalicules. L'ensemble présente des aspects de caries qui suggèrent une désorganisation avec perte de substance. La trans-

formation du squelette se traduirait alors par une perte de silice, perte qui débiterait dans les matériaux eux-mêmes. Ce n'est pour l'instant qu'une hypothèse.

L'argilification des horizons B, en Haute-Volta, a coïncidé avec un approfondissement du sol par création discontinue dans la matrice sableuse de noyaux plus argileux, tout de suite rubéfiés. En plus, il y a néoformation de véritables "pseudo-sables". Dans le cas de la Casamance, il s'agissait plutôt d'une digestion d'un niveau gréseux induré, avec cependant enrichissement en argile et augmentation de stabilité des pseudo-particules.

Enfin, le fait morphologique de l'appauvrissement en argile granulométrique a correspondu à une nouvelle accélération du phénomène de modification de taille des quartz.

3) Les références bibliographiques

Récemment De CONINCK et HERBILLON (1969) ont indiqué que des quartz se fragmentaient des des alfisols de régions tempérées. Cette fragmentation est mise en relation étroite avec le lessivage du fer. Mais dans les régions tropicales, et depuis très longtemps, de nombreux auteurs ont insisté sur la possibilité d'une désagrégation des quartz.

AUBERT (1946) indique qu'en milieu ferrallitique même les quartz deviennent pulvérulents. MAIGNIEN (1962) note l'importance de leur corrosion dans les sols de Casamance. DIENG (1963) décrit la digestion des cristaux de quartz par les oxydes de fer dans le Continental terminal. LENEUF (1966) décrit le blanchissement des quartz dans les altérations sur granites, et la réalité de leur microdivision. Dans ses bilans géochimiques, il y a même plusieurs cas où les teneurs en quartz diminuent nettement. LELONG (1968), bien que prenant le quartz comme invariant dans ses bilans, conclut à une perte minimum de 15 % de ce minéral entre le bas et le haut des profils ferrallitiques. CHAUVEL et PEDRO (1967) démontrent la fragilité des

quartz envahis par le fer et la difficulté d'utiliser certaines méthodes granulométriques. LEPRUN (1967) décrit des grains de quartz de 500 microns avec des microfissures remplies de fer, déterminant des mailles inférieures ou égales à 50 microns. WAKERMANN (1968) souligne la tendance au déplacement du mode des sables quartzeux vers les tailles limonitiques. MARTIN D. (1967) donne un rôle important à la fragmentation des quartz dans les sols hydromorphes. Par contre, De CRAENE et LARUELLE (1955) insistent plutôt sur la néoformation de quartz dans la transformation d'un matériau parental de latosol. Enfin, récemment BEAUDOU (1970) a observé que les grains de quartz dans des sols sur grès présentent un picotis intense, indice d'un début de dissolution.

4) Les données nouvelles

Cet aperçu bibliographique indique que la désagrégation des quartz dans les régions tropicales est connue depuis longtemps. Mais les données nouvelles qui résultent de l'étude des deux toposéquences sont les suivantes :

- a) La transformation des sables est un phénomène qui affecte non seulement les niveaux d'altération ferrallitique sur roches éruptives, mais également les roches sédimentaires riches en quartz.
- b) La transformation affecte différemment les diverses classes granulométriques, la fraction grossière étant attaquée en premier lieu.
- c) cette transformation se traduit par une modification importante de la granulométrie, ayant pour conséquence un enrichissement relatif en sables de taille moyenne.
- d) La pulvérisation des quartz est associée, d'une part au mode d'approfondissement des profils aux dépends de l'horizon C, d'autre part à l'appauvrissement en argile et en fer des horizons supérieurs.
- e) Cette pulvérisation des quartz est liée strictement à l'importation du fer dans le milieu. Les différentes étapes sont les suivantes :
 - la fissuration des quartz apparaît, ou devient plus marquée dans les cas où la fissuration est préexistante dans les matériaux.
 - le fer entoure les grains de quartz et pénètre dans les fissures.

- les quartz éclatent, mais restent inclus dans une matrice argileuse rouge. Ce serait le premier stade de la formation des "pseudo-sables".
- le fer pénètre dans des cupules et dans des canalicules, donnant au quartz un aspect carié.

- f) Le fait de l'apparition de ces cupules et de ces canalicules suggère une désorganisation du quartz avec perte de substance. Cette substance ne peut être que de la silice.
- g) La possibilité d'une libération de silice n'est pour l'instant qu'une hypothèse. Cependant, cette hypothèse s'appuie non seulement sur l'observation des états de surface des quartz, mais aussi sur la diminution relative en surface, sur les lames, du squelette par rapport au plasma. Il semble en effet que le squelette quartzueux subit une sorte de fonte. Celle-ci étant vérifiée, ce serait une confirmation que la diminution de taille affecterait bien l'ensemble des classes granulométriques, et non plus seulement certaines d'entre elles.

En résumé, les études du squelette quartzueux ont été effectuées afin de vérifier l'homogénéité latérale des couches sédimentaires. Cette dernière étant acquise, il est possible d'utiliser la méthode des profils latéraux pour définir l'ampleur des transformations subies par les roches-mères devenues des horizons B de sols rouges.

CHAPITRE V

LA DIFFERENCIATION TEXTURALE DES HORIZONS B

Les différentes données acquises lors de la présentation des sols (première partie), et les résultats obtenus lors de la caractérisation des matériaux originels, permettent de ramener la différenciation des horizons B à deux groupes de phénomènes :

- des modifications texturales, auxquelles se lient des caractères secondaires de saturation en bases.
- l'acquisition de la rubéfaction, à laquelle peut se rattacher la création d'une structure.

Les modifications texturales correspondent, en premier lieu, à l'augmentation relative de la fraction granulométrique de taille inférieure à deux microns. Cependant, l'étude des sables nous a également révélé des modifications d'origine pédologique affectant la fraction granulométrique comprise entre 2 et 2.000 microns (2 mm). De plus, elle a mis en évidence la néoformation de certains autres éléments de la granulométrie, appelés généralement "pseudo-sables".

L'acquisition de la rubéfaction correspond à un enrichissement en fer, mais elle a été également associée aux modifications texturales précédentes. Malgré l'existence de cette interaction, il nous a semblé nécessaire de dissocier dans le texte les modifications texturales et la rubéfaction, afin de faciliter la présentation des données et leur interprétation.

Dans le présent chapitre, sur la différenciation texturale, sans revenir sur la modification de la granulométrie des quartz, nous examinerons d'abord la néoformation de particules complexes (pseudo-sables), puis celle de particules dont la taille est inférieure à 2 microns (argile granulométrique).

A - LES ELEMENTS DE NEOFORMATION DE LA GRANULOMETRIE

Dans la description de sols rouges sur grès, (première partie) nous avons insisté sur la généralisation, des "pseudo-sables", c'est-à-dire de petits agrégats résistants. Au chapitre précédent, ces pseudo-sables ont été mis en évidence par des divergences observées lors des analyses granulométriques des sables avec et sans déferrification. Des examens à la loupe binoculaire ont également permis de vérifier leur importance dans certains échantillons.

C'est VAGELER (1930) qui, le premier, a utilisé ce terme de pseudo-sables, CHAUVEL et PEDRO (1967) ont proposé de les appeler "pseudo-particules", car ils sont répartis non seulement dans les sables mais aussi dans les autres fractions granulométriques, limons et argiles.

1) Données bibliographiques

De nombreux autres auteurs ont observé de tels éléments complexes de la granulométrie dans les régions tropicales, d'abord dans les horizons rubéfiés de sols sur grès (SLANSKY, 1959, MARIUS, 1962, WILLAIME, 1965 a, PIAS et BARBERY, 1965, AUDRY, 1965), puis dans d'autres sols ferrallitiques rouges (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965, GUICHARD, 1966 a, LEVEQUE, 1967). Ce dernier auteur a proposé l'expression "d'éléments de néoformation" de la granulométrie. Ces pseudo-sables ont été mis en évidence de façon indirecte par DESHPANDE, GREENLAND et QUIRK (1968) à l'aide de traitements à base de dithionite de sodium sur divers sols rouges d'Australie. Les traitements aboutissent à un accroissement des taux d'argile, avec élimination de fer et de silice. TERCINIER (1969) note également "la désagrégation insuffisante des pseudo-agrégats de dessiccation" et "des ciments liant entre elles les particules fines lors de l'analyse mécanique".

D'autres auteurs ont cité la présence de particules complexes dans des sols des régions tempérées : MC ALEESEE et MC DONAGHY (1968) en Irlande, GERASIMOW et ROMASKHOVICH (1967) en Géorgie sous la forme de micro-

concrétions de fer. Pour les brunizems des U.S.A., EDWARD et BREMNER (1962), ont remarqué la difficulté de dispersion des agrégats de diamètre inférieur à 250 microns, constitués par de l'argile et des matières humifères reliées par des métaux polyvalents.

Les pseudo-particules ne sont donc spécifiques ni des sols rouges sur grès, ni des régions tropicales. Dans le cas des sols rouges sur grès, elles posent un certain nombre de problèmes dont la plupart sont actuellement à l'étude (CHAUVEL, 1970 et thèse à paraître).

Les principales questions posées concernent :

- leur origine, qui est soit un héritage des roches-mères, soit une néoformation de la pédogénèse. Dans ce cas le mécanisme de leur élaboration est à élucider.
- leur constitution élémentaire, compte tenu de ce qui existe dans les sols : quartz, hydroxydes de fer sous différentes formes cristallisées ou amorphes, kaolinite, composés organiques.
- leur stabilité en fonction de leur taille, de leur position dans les profils et de celle de ces derniers dans les toposéquences.
- leur rôle éventuel dans le développement de la pédogénèse (structuration, drainage) et les conséquences de leur disparition.

2) Caractérisation des pseudo-particules

2.1 - Les méthodes

Répondre à ces questions exige la mise au point préalable de méthodes analytiques sûres et fidèles de caractérisation. CHAUVEL s'est attaqué à cette recherche, en travaillant sur des profils de sols rouges de Casamance utilisés dans ce travail, en particulier ceux de la toposéquence de Séfa (CHAUVEL et MONNIER, 1967 ; CHAUVEL et PEDRO, 1967 ; CHAUVEL et FAUCK, 1969). CHAUVEL et MONNIER (1967) ont mis en évidence la divergence des résultats selon les méthodes d'analyse granulométrique, en particulier leur effet de dispersion plus ou moins poussé, et de dissolution inégale

des ciment^s. Ils posent le problème de la mesure de la distribution granulométrique élémentaire, par rapport à celle caractérisant le comportement du matériau dans le milieu naturel. Pour eux, comme pour HENIN (1967) le concept de texture est donc à réviser.

CHAUVEL et PEDRO (1967) donnant le nom de "pseudo-particules" aux agrégats complexes récoltés avec les sables grossiers, les séparent des grains de quartz par leur densité inférieure (décantation avec un mélange d'alcool et de bromoforme). La diffraction X et la thermogravimétrie leur permettent de dire qu'il s'agit d'un mélange de 45 % de quartz, 45 % de kaolinite, associés à des sesquioxydes libres ($Fe_2O_3 = 5,9 \%$), représentés principalement par des hydrates ferriques amorphes et par un peu d'hématite. Les composés ferrugineux amorphes semblent former le ciment, puisque différents traitements de déferrification se traduisent par une augmentation nette des teneurs en argile granulométrique. Cependant, l'utilisation de la technique d'attaque par l'hydrogène naissant, qui est le traitement qui s'avère le plus déferrifiant (méthode JEFFRIES, 1946) s'est traduit par "une véritable fragmentation des grains de quartz originels, consécutive à la dissolution des oxydes de fer incrustés dans les microfissures d'un certain nombre de particules élémentaires sableuses". CHAUVEL et PEDRO admettent que ce phénomène pourrait être à l'origine de la pulvérisation des quartz en milieu tropical. Cette conclusion, qui rejoint celle formulée lors de l'examen micromorphologique du profil HFA, confirme le rôle donné au fer dans la transformation du squelette quartzueux par la pédogénèse. Elle en indique le mécanisme probable.

BLOT et PEDRO (1967) aboutissent à des conclusions comparables en travaillant sur des sols hydromorphes d'Europe développés sur des matériaux originels datant du Plio-Villafranchien. Ils définissent une "granulométrie virtuelle", établie à partir du couplage systématique des données granulométriques et de l'étude de la composition minéralogique. LEAL SILVA et SEGALEN (1968) utilisant un prétraitement au benzène sur des échantillons de sol rouge sur grès au Dahomey, (Godomey), notent également une augmentation des éléments fins.

2.2 - Les résultats

Nous avons utilisé nous-mêmes, en Casamance et en Haute-Volta, des techniques de déferrification, avec examen systématique des sables à la loupe binoculaire. Ces techniques ont été le plus souvent l'attaque par HCL 4N des sables récupérés de l'analyse mécanique normale, avec utilisation de H₂O₂ technique. Mais, selon les méthodes analytiques, les résultats peuvent être très différents. Ainsi, l'utilisation d'eau oxygénée technique, classique dans les laboratoires de pédologie, se traduit par une désagrégation artificielle des pseudo-particules, que ne provoque pas l'eau oxygénée "électro" (CHAUVEL et FAUCK, 1969). Compte tenu de ces difficultés d'ordre pratique, nous avons jugé nécessaire d'associer aux granulométries les résultats des attaques triacides. Cette dernière technique fournit les teneurs en silice et en alumine combinée, sous forme de minéraux argileux, ainsi qu'une évaluation du pourcentage de silice sous forme de quartz. Sur les prélèvements étudiés, les analyses effectuées aux rayons X, ayant montré l'existence exclusive de kaolinite, et l'analyse triacide ayant fourni un rapport SiO₂/Al₂O₃ toujours compris entre 1,8 et 2,1, nous avons calculé un taux de "kaolinite théorique" à partir des chiffres de SiO₂ et d'Al₂O₃. La formule utilisée est celle d'une kaolinite composée de 39,5 % d'Al₂O₃, de 46,5 % de SiO₂ et de 13,7 % de H₂O.

Toutes ces méthodes ou calculs ont leurs inconvénients, mais la comparaison de leurs résultats se révèle instructive. En général, les teneurs en argile granulométrique et les chiffres de kaolinite théorique ont été assez voisins. Mais, pour certains prélèvements, il y a divergence nette. C'est le cas des profils HFB et HF 32 de Haute-Volta dont le tableau N° B 7 nous présente les résultats.

TABLEAU n° B 7 - Granulométrie de la fraction argileuse en Haute-Volta

HFB n°	profondeur	Taux d'argile (analyse granulométrique)	Al (analyse triacide)	Argile calculée d'après Al x 2,53	Fe Total	Argile (analyse après déferrification)
2	10 - 20	43,3	14,75	37,5	4,0	
4	100	32,1	14,25	36,2	3,25	
5	150	7,6				39,3
6	200	10,6				44,2
7	250	<u>8,5</u>	16,0	<u>40,5</u>	5,50	<u>39,3</u>
8	300	11,0	16,15	41,0	5,75	
9	350	15,5	15,5	39,2	4,50	
11	450	25,0	15,25	38,7	4,25	
HF						
325	150	43,4	23,0	51,4		47,6
327	250	<u>19,7</u>	20,2	<u>45,5</u>		46,0

Les quantités d'argiles définies par l'analyse mécanique et par le calcul sont parfois très différentes. C'est le cas des horizons 7, 8, 9 et 11 du profil HFB. L'examen des sables après la première analyse mécanique ayant montré qu'il restait de très nombreuses pseudo-particules contenant des grains de quartz enrobés par une matrice argileuse, certains échantillons ont été déferrifiés. En particulier le HFB 7 a été traité par l'HCL4N à 60°, pendant une heure. Une seconde analyse mécanique a alors fourni des chiffres d'argile en rapport avec ceux qui avaient été calculés. La nouvelle répartition dans les différentes fractions granulométriques, qui ont toutes diminué nettement, démontre que la kaolinite était répartie dans toutes les classes granulométriques, sous forme de pseudo-particules (Tableau B 8).

TABLEAU n° B 8 - Analyses mécaniques du prélèvement HFB 7 avec et sans déferrification

HFB 7 Analyses mécaniques	Argile Limon		Limon grossier	Sable fin	Sable grossier
Sans déferrification	8,5	3,5	5,2	23,0	59,8
Avec déferrification	39,3	0	1,2	12,6	46,9

Les deux profils HFB et HFA 32 sont des exemples extrêmes, car les différences sont souvent plus faibles, parfois nulles. Ce dernier cas ne veut d'ailleurs pas dire qu'il n'y ait pas de pseudo-particules, mais qu'elles ont pu être détruites par la méthode de dispersion. Une notion complémentaire de stabilité des pseudo-particules s'impose donc, stabilité qui serait probablement en rapport, d'une part avec la taille des agrégats d'autre part avec leur composition.

Ces deux problèmes n'ont pas été plus spécialement approfondis dans ce travail, mais nous avons cependant remarqué la richesse en fer des échantillons de HFB et HF 32. Ce sont d'ailleurs dans ces échantillons que les plus grandes différences ont été observées entre les granulométries de sables avec et sans déferrification préalable. Cependant, il n'a pas été possible de dire s'il existe un rapport de cause à effet entre l'intensité du morcellement des quartz par le fer et la quantité, (et probablement) la stabilité, des particules complexes. C'est souvent la divergence existant entre la texture notée sur le terrain et celle donnée par l'analyse, qui constitue un indice de la présence de pseudo-particules. L'analyse mécanique peut, en effet, détruire ces agrégats par dispersion, et de ce fait la comparaison avec et sans déferrification peut n'apporter aucune précision supplémentaire.

2.3 - Les interprétations

Dans ces conditions, il convient d'interpréter les résultats de l'analyse granulométrique avec prudence et de la considérer, avec CHAUVEL et PEDRO (1967), "beaucoup plus comme un moyen d'étude d'un matériau donné

que comme une méthode conduisant directement à la détermination de sa composition élémentaire". Cette prudence s'impose d'autant plus que c'est souvent sur les résultats d'une simple analyse mécanique que se basent les pédologues pour définir des lessivages et des accumulations d'argiles, et en déduire la place des sols dans la classification.

Finalement, les pseudo-particules peuvent être définies comme des agrégats complexes, de dispersabilité variable, moyennement cohérents et répartis dans les argiles, les limons, les sables fins et grossiers. Leur composition associe de l'argile kaolinitique et des hydroxydes de fer, qui cimentent des grains de quartz craquelés, ou du moins rendus fragiles par l'imprégnation ferrugineuse. Leur stabilité est variable : les fractions grossières sont les premières morcellées en unités plus petites lors des traitements de déferrification. CHAUVEL note d'ailleurs la progressivité de leur composition et de leur stabilité, ce qui rend complexe une individualisation par une seule méthode analytique.

Ces pseudo-particules constituent une des caractéristiques les plus constantes des sols rouges sur grès, bien qu'elles ne soient probablement pas spécifiques de cette catégorie de sols. En effet, on les retrouve dans un certain nombre de sols ferrallitiques et même ferrugineux tropicaux, où HERBILLON, PECROT et VIELVOYE (1966) les considèrent comme un "caractère de sénilité". Leur présence est associée à la rubéfaction et à l'enrichissement en argile des horizons B. Mais avant de conclure à leur création par un mécanisme uniquement pédogénétique, il convient de distinguer plusieurs autres origines possibles.

Dans un certain nombre de profils (voir chapitre précédent) la comparaison latérale a associé des niveaux sableux blancs, sans pseudo-particules nettement observables, à des horizons bariolés, contenant des secteurs rubéfiés argileux à pseudo-particules. Ces dernières sont identifiables à la loupe binoculaire, mais elles sont plus difficilement mises en évidence par les analyses de laboratoire. Il s'agit donc d'une création de la pédogénèse, et cette création suppose un enrichissement relatif en argile et en fer par rapport au reste de la matrice. Cet enrichissement

se poursuit même dans les horizons rubéfiés, et CHAUVEL a observé que les pseudo-particules contiennent plus de fer et plus d'argile dans les horizons B₂ que dans les autres horizons. Certains auteurs ont noté également que la quantité apparente de ces pseudo-sables augmentait en profondeur (TOBIAS, 1965 ; LEPRUN, 1967 ; SEGUY, 1969).

Dans d'autres profils, les corrélations faites sur le plan latéral ont associé des niveaux gréseux à des horizons B rubéfiés. Dans les niveaux gréseux des résultats aberrants d'analyse mécanique ont permis de définir la présence d'agrégats ayant une certaine résistance à la dispersion. Ces pseudo-particules sont donc héritées des matériaux originels. L'examen des analyses nous incite à penser qu'elles auraient une composition différente de celles néoformées dans les sols, et en particulier une plus grande richesse en fer par rapport à l'argile (rapport Fe/Al).

Enfin, il existe un troisième cas, celui du profil HF 33, qui contient des secteurs grésifiés dans ses horizons B, c'est-à-dire des agrégats très cohérents et apparemment riches en fer, alors que la corrélation latérale leur associe des niveaux de roche-mère non indurés. Ces niveaux grésifiés sont-ils le résidu d'une roche-mère discontinue sur le plan latéral ? Ou ont-ils été formés localement, après la sédimentation, par un mécanisme en rapport avec des pédogénèses anciennes ou actuelles ? Nous rappelons, en effet, que la création de niveaux gréseux par la pédogénèse a effectivement été envisagée par plusieurs auteurs (cf. 1ère Partie). Cette question ne pourra être reprise qu'après l'étude des formes du fer. Mais de toute façon, il semble qu'il y aurait une distinction à faire entre grèsification et création de pseudo-particules par pédogénèse. Le premier cas pourrait concerner la cimentation plus ou moins homogène d'un squelette quartzeux par des hydroxydes de fer, le second cas la création de particules complexes riches en argile autant qu'en fer et représentant une certaine micro-hétérogénéité dans l'espace. Une déferification peut laisser subsister des agrégats argileux gris plus ou moins cohérents, alors qu'elle détruit toutes les particules dans le premier cas.

3) Conclusions

La néoformation des pseudo-particules par pédogénèse est un fait indéniable. Cette création suppose essentiellement un réarrangement des constituants argile et fer par rapport aux quartz, ayant pour conséquence une structuration bien particulière à laquelle se relie le phénomène de rubéfaction. Un tel réarrangement ne peut se concevoir que par des déplacements relatifs de ces divers constituants. Les possibilités sont limitées, soit à l'importation de fer et d'argile, ou de fer et d'alumine, soit à l'exportation de silice. Peut-être même les deux mécanismes coexistent-ils. Avant de conclure, il nous faut donc étudier en détail ces enrichissements en argile, puis ceux en fer.

B - L'ARGILIFICATION

DEFINITIONS -

Dans le présent travail nous utiliserons le terme d'argilification dans le sens suivant : enrichissement relatif en particules de taille comprise entre 0 et 2 microns (argile granulométrique).

Nous utiliserons le mot Kaolinisation pour décrire l'augmentation des quantités de minéraux argileux kaolinitiques résultant de l'altération des minéraux primaires. L'argilification a un sens granulométrique, la kaolinisation un sens minéralogique. L'argilification peut être due à l'importation de kaolinite ou à une kaolinisation. Mais cette dernière peut fournir des minéraux argileux de taille supérieure à 2 microns.

Les taux d'argilification sont le rapport entre l'argile granulométrique de l'horizon par rapport aux taux existant dans les roches-mères.

1) Les faits et leur importance quantitative

Dans les deux toposéquences de référence, les différents matériaux originels possèdent des quantités d'argile granulométrique très différentes.

Les niveaux sableux des puits HF de Haute-Volta ont des teneurs inférieures à 5 %, celles des niveaux gréseux de Casamance dépassent 25 %.

Or, en considérant l'ensemble des profils de sols, la majorité des horizons B contient des teneurs en argile de 35 à 55 %. Apparemment les taux d'argilification peuvent donc être très variables. La méthode des profils latéraux doit nous permettre de mieux les préciser. Mais une incertitude subsistera sur la connaissance des profils en haut de pente, pour lesquels il sera souvent impossible de caractériser l'état de départ le plus probable. Ce sont donc les profils situés à mi-pente dans les toposéquences qui pourront être le mieux étudiés. Mais il ne sera pas possible d'extrapoler les résultats obtenus, l'étude des sols "associés" nous ayant montré que des matériaux équivalents peuvent évoluer différemment selon la position dans la toposéquence. En définitive, l'étude des profils latéraux est une méthode utile pour apprécier le point de départ de l'évolution pédologique d'un certain nombre d'horizons. Elle n'est pas suffisante pour faire les bilans à l'échelle d'une toposéquence complète.

1.1 - Toposéquence de Haute-Volta

La figure B 16 concerne les horizons B et C du profil HFA. Elle représente la répartition des teneurs en argile granulométrique (mesurée au laboratoire), celle des taux de kaolinite calculés à partir des résultats de Si et Al (analyses triacides), et celle des teneurs en fer et en titane totaux.

La courbe de répartition de l'argile dans les horizons B ne présente pas de discontinuités qui auraient pu provenir de l'héritage des argiles des matériaux. Or, il est remarquable que cette forme de courbe se retrouve dans le reste de la toposéquence et dans tous les profils de la région. Apparemment, la pédogénèse aurait donc nivelé les différences initiales, qui sont probables d'après ce que l'on sait de l'hétérogénéité des roches-mères. De plus, les formes des courbes de répartition de tous les éléments considérés sont voisines dans les horizons B, en particulier celles du fer et de

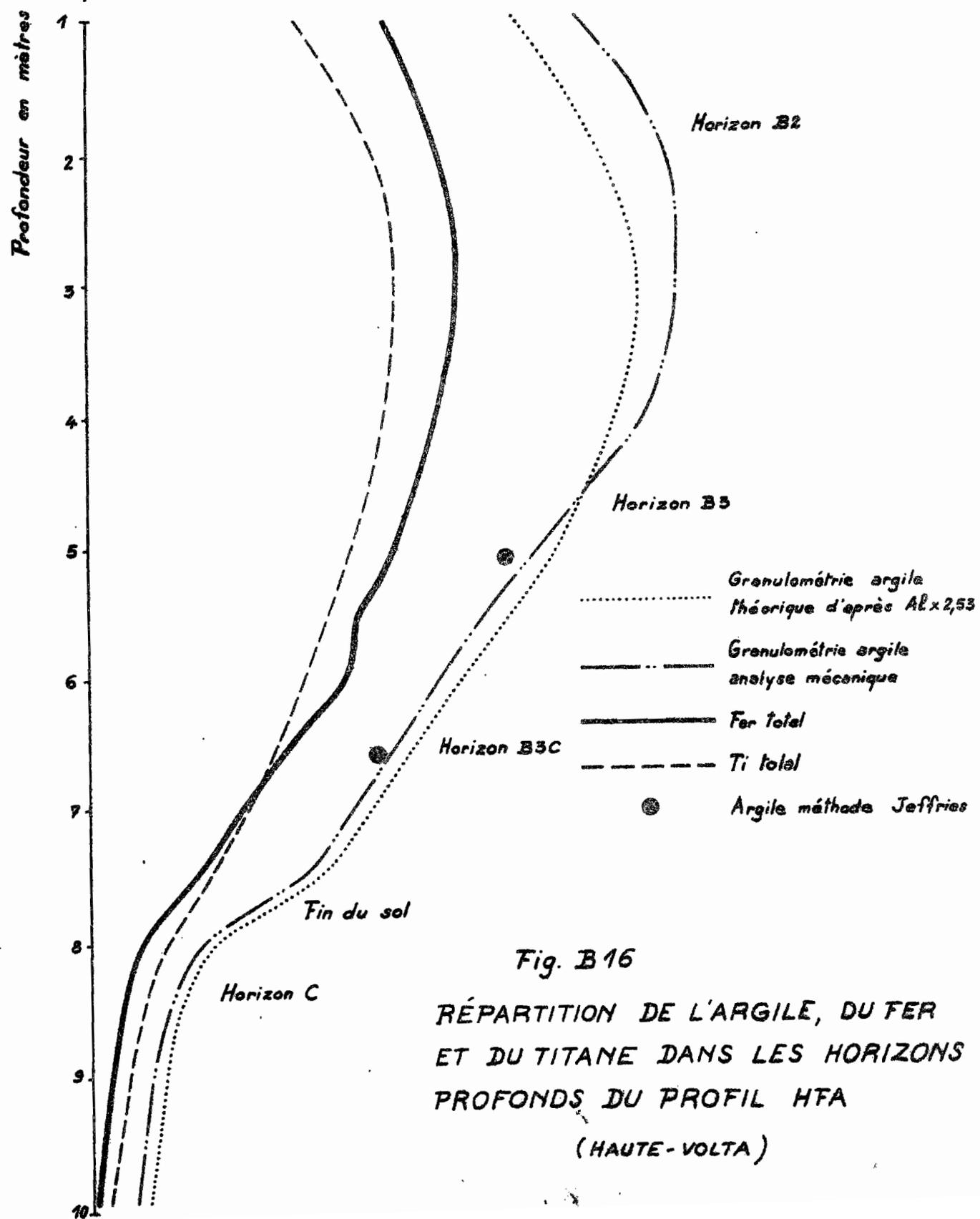
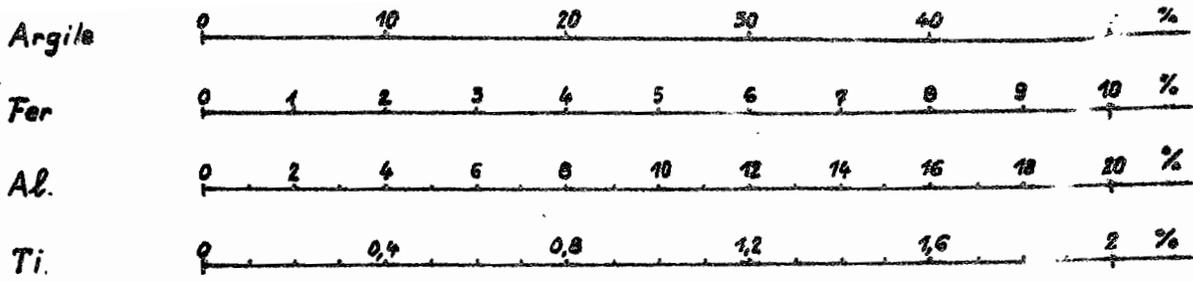


Fig. B16
 RÉPARTITION DE L'ARGILE, DU FER
 ET DU TITANE DANS LES HORIZONS
 PROFONDS DU PROFIL HFA
 (HAUTE-VOLTA)

l'argile. Par contre dans les horizons B₃ et C des différences apparaissent nettement.

L'utilisation de la méthode des profils latéraux entre les trois profils HFA, HF 33 et HFB permet la comparaison des couples suivants (tableau B° B 9).

TABLEAU N° B9-Toposéquence de Haute-Volta : passage des horizons C à B

Horizons	HFA 34-HFB 19	HFA 26-HFB 12	HFA 21-HFB 7	HFA 18-HFB 4	HFA 14-HF337/8
	Horizons C-C	C - BC	C - B2	BC - B 1	B 3 - B 2
Argile granulométrique	2,7 - 3,2	1,5 - 12,8	3,7 - 44,1	17,3 - 32,1	29,5 - 21,2
Alumine	1,7 - 1,3	1,1 - 7,4	2,0 - 16,0	7,5 - 14,2	12,75- 12,85
Fer	1,2 - 3,9	0,05- 2,3	0,10- 5,5	2,0 - 3,25	4,0 - 3,75
Titane			0,015 0,80	0,44- 0,71	0,71- 1,17
Kaolinite calculée	4,3 - 3,3	2,9 - 3,4	5,1 - 41,0	19,2 - 36,4	32,5 - 35,6

L'argilification de l'horizon B₂, de HFB, par rapport aux matériaux originels trouvés sous HFA, peut donc représenter un saut de 3,7 % à 44,2 % d'argile, soit un gain de 40 % en valeur absolue et un coefficient d'enrichissement relatif de 12. Cependant ce coefficient est plus faible pour l'alumine, dont les teneurs passent de 2 à 16 %. Il est plus élevé pour le fer dont les teneurs sont très faibles au départ. La transition entre la roche-mère et l'horizon B₂ se réalise dans les horizons BC par une variation progressive des rapports entre les différents constituants, alors que les horizons B₂ présentent au contraire une certaine homogénéité.

Nous avons vu précédemment que les horizons de transition sont hétérogènes et qu'en réalité il y a juxtaposition de secteurs argileux et de secteurs sableux qui disparaissent peu à peu. Le front d'argilification qui progresse vers le bas des profils est donc discontinu. Sa progression

pourra être plus ou moins rapide selon les caractéristiques des roches-mères rencontrées successivement (teneur en argile, granulométrie des sables). Mais rien n'indique pour l'instant si ce front d'argilification est stabilisé ou s'il continue à progresser.

Enfin un point important est à noter : l'augmentation des teneurs en titane, le matériau originel restant identique. Cette augmentation ne peut-être que d'origine pédogénétique.

1.2 - Toposéquence de Casamance

La toposéquence de Séfa fournit de nombreux couples se correspondant latéralement entre les profils, mais peu de couples roche-mères non transformées- horizon B₂ du sol.

Le tableau suivant B 10 présente un certain nombre de résultats. Dans certains cas un profil latéral comprend des horizons dans trois profils successifs sur la toposéquence.

TABLEAU n° B 10 - Toposéquence de Casamance ; Passage des horizons C à B

CA	544 - 463 - 487	541 - 460 - 484	434 - 453	589 - 524
Horizons	C - B3C - B3	C - BC3 - B2	B3 - B2	B3C - B2
Argile granu lomètrique	31,5 - 31,5 - 28,1	33,7 - 38,5 - 33,6	36,5 - 51,5	23,7 - 47,0
Al	15,0 - 15,0 - 18,0	17,0 - 17,0 - 18,0	18,0 - ?	17,75- 18,5
Fe	4,25- 6,0 - 6,0	4,5 - 4,5 - 5,0	5,0 - ?	6,5 - 4,5
Ti	1,25- ? - 1,45	≠ 1,31 -1,36 -1,45	≠ 1,35 - ?	? - 1,35
Kaolinite calculée	38,5 - 38,5 - 46,0	32,7 - 43,5 - 46,0	46,0 - ?	45,5 - 47,4

L'examen de ce tableau indique que le taux d'argilification est nettement plus faible que dans le cas de la Haute-Volta. Le point de départ est plus élevé car les matériaux originels sont déjà assez argileux. Entre

la teneur moyenne dans les horizons C (celles des roches-mères ne sont pas connues), et les teneurs les plus élevées dans les horizons B des profils, il y a au maximum doublement des quantités d'argile. Cependant, les taux d'augmentation sont plus faibles pour l'aluminium. La quantité de kaolinite calculée à partir des teneurs en Al indiquerait donc une argilification plus faible que celle suggérée par l'analyse mécanique. La divergence entre les deux séries de résultats croît en allant des horizons C vers les horizons B. Enfin, il faut noter que des différences faibles d'enrichissement existent pour le fer et le titane.

1.3 - Discussion des résultats analytiques

L'argilification entre les horizons C et les horizons B est un fait. La méthode des profils latéraux prouve qu'elle ne s'explique pas par l'hétérogénéité des roches-mères (séquence négative de MILLOT, 1964). Mais il y a, dans les deux toposéquences, des divergences sur l'importance de cette argilification selon que l'on utilise les résultats de l'analyse granulométrique, ou ceux de l'analyse total triacide.

Plusieurs explications peuvent être retenues :

a) analyse mécanique incomplète du fait que la présence de pseudo-particules.

Cela se traduit comme nous l'avons vu précédemment par une sous-estimation de la fraction 0 à 2 microns. Par conséquent on pourrait, dans certains cas, sous-estimer l'accumulation d'argile dans les horizons B par rapport aux roches-mères, ces horizons B étant surtout caractérisés par leur rubéfaction et leur structuration. La présence de pseudo-particules a été effectivement vérifiée dans toutes les toposéquences, tant à l'examen sur le terrain que lors de l'examen à la loupe binoculaire des sables résultant de l'analyse granulométrique. Mais, en fait, cette explication ne peut s'appliquer qu'aux cas où les enrichissements en alumine sont relativement plus élevés que ceux en argile, ce qui est assez rare.

b) toute l'alumine n'est peut-être pas enfermée dans un minéral kaolinitique.

Or, nous avons effectué le calcul de la kaolinite théorique à partir des teneurs en alumine, et non à partir de celles en silice, car cette dernière peut être libérée du quartz lors de l'analyse triacide (CLAISSE, 1968). L'alumine pourrait être extérieure à la kaolinite, soit sous forme libre, soit incluse dans des minéraux en voie d'altération. La présence d'alumine libre en quantités faibles est plausible si on se réfère au rapport SiO_2/Al_2O_3 , rapport souvent légèrement inférieur à 2,0. Elle ne serait pas sous forme cristallisée, car elle n'a pas été décelée aux analyses : RX, ATD et ATP. Mais il ne semble pas que son importance quantitative puisse fausser gravement une analyse granulométrique. La présence de minéraux altérables (feldspaths) a été notée dans quelques échantillons de roche-mère. Mais dans les horizons B des sols des deux toposéquences il ne reste plus que des résidus d'illite, et des interstratifiés en quantités très faibles. Les possibilités d'alumine non kaolinisée semblent donc ne pouvoir expliquer que des divergences relativement faibles, ce qui est insuffisant.

c) taille de la kaolinite.

Dans certains sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire les minéraux kaolinitiques peuvent avoir des tailles supérieures à 2 microns, et même atteindre 100 microns dans les matériaux d'altération en place (BOULET, 1962). DELVIGNE (1965) a décrit des empilements de kaolinites géantes à l'emplacement d'anciens feldspaths et micas. LELONG (1967) a signalé de son côté des agglomérats de particules kaolinitiques, pouvant modifier le rapport limon fin/argile. De tels minéraux argileux n'ont pas été décelés dans les échantillons de sol sur Continental terminal que nous avons observé. Cependant, l'existence de minéraux ou de groupes de minéraux de taille comprise entre 2 et 20 microns est cependant possible. Elle ne semble toutefois pas jouer un rôle très important dans le cas présent.

d) composition de la fraction granulométrique.

La fraction granulométrique peut comprendre, en plus de la kaolinite, des quartz de tailles très fines, des hydroxydes et des minéraux divers. Dans ces conditions, une partie des résultats non concordants pourrait être explicable si les éléments autres que les minéraux argileux étaient en proportion élevée. LEVEQUE (1966) décrit des cas de sols fortement ferrallitiques sur roches basiques où les teneurs en kaolinite n'atteignent pas 20 %, le reste étant essentiellement des hydroxydes d'alumine ou de fer, de taille inférieure à deux microns. Dans ces conditions, la composition de la fraction argileuse pourrait effectivement expliquer certaines anomalies.

1.4 - Conclusions

L'argilification est un phénomène prouvé par la méthode des profils latéraux. Son importance est variable, mais l'évaluation exacte de son intensité dépend des méthodes analytiques employées. Plusieurs explications ont été envisagées. Il apparaît que les divergences entre les teneurs en kaolinite calculée à partir de Al et les quantités d'argile granulométrique peuvent provenir :

- de la présence de pseudo-particules.
- surtout de la composition de la fraction granulométrique argileuse.

Avant d'essayer d'établir un bilan de l'argilification, il est donc nécessaire de préciser les caractéristiques de cette fraction granulométrique.

2) Etude de la fraction granulométrique argileuse

Nous examinerons successivement l'aspect quantitatif (composition de la fraction) et l'aspect qualitatif (état des minéraux argileux).

2.1 - Composition de la fraction granulométrique

Les résultats d'analyses triacides effectuées sur des prélèvements variés, mais de taille inférieure à 2 microns, nous ont montré que la fraction argileuse pouvait comprendre, en plus de la kaolinite, des hydroxydes

de fer, du titane et du quartz en quantités variables. Les rapports moléculaires SiO_2/Al_2O_3 généralement très proches de 2,0 justifient le calcul d'un taux de kaolinite théorique, en combinant silice et alumine. Un excès de silice apparaît alors, on l'interprète comme étant du quartz, caractérisé d'autre part par diffractométrie. Un excès d'alumine est constaté dans certains échantillons, mais sans jamais atteindre de valeurs très importantes (2 à 3 %).

a) Compositions de fractions argileuses

Le tableau suivant, n° B 11, présente pour les horizons B les résultats concernant les prélèvements CA 134 (Casamance, et G 36 (Dahomey)

TABLEAU n° B 11 - Compositions de fractions granulométriques

Echan- tillons	Fractions en microns	Kaolinite calculée	Al libre	Fer total	Quartz (ou Si non com- binée)	Titane et divers
CA 134	0 - 2	75,2	2,3	5,7	14,3	2,3
G 36	0 - 2	92	0	5,15	0,68	1,43
	0 - 2000	51,2	0	3,0	46,0	0,74

Dans l'horizon B du profil CA 13 il est évident que le taux de kaolinite calculé sur la terre fine, à partir des teneurs en alumine et sans tenir compte de l'alumine libre, fournit une valeur légèrement différente de la réalité. Mais le fait que la fraction 0 - 2 microns contienne 25 % de produits autres que des minéraux argileux suffit à expliquer des divergences importantes entre calcul théorique de kaolinite et analyse granulométrique de la fraction argileuse.

b) Evolution dans le profil de la composition de la fraction argileuse

Pour la toposéquence de Haute-Volta, compte tenu des faibles quantités de limons (2 à 20 microns), nous avons effectué des analyses triacides sur la fraction 0 à 20 microns d'un profil complet, HFA.

Les résultats sont les suivants :

TABLEAU N° B 12 - Composition de la fraction granulométrique 0-20 microns : profil HFA

HFA		Fraction 0-2 microns par calcul				Terre totale par analyse	
Profondeur cm	N° prél.	Kaolinite calculée	Quartz	Fer	Titane	Argile 0 - 2 microns	Limon 2-20 microns
60-70	4	76	7,65	10,50	0,98	36,6	2,6
200	7	76	7,60	10,50	1,08	44,4	5,2
350	10	76,5	6,75	10,30	1,10	44,1	7,0
450	12	77	6,55	10,00	1,13	38,6	7,5
700	17	77	7,50	9,50	1,10	20,2	4,5
900	19	86	5,60	7,0	0,95	9,2	1,5
1000	21	96	2,85	1,1	0,45	3,7	0,2
1250	26	95	3,15	1,4	0,70	1,2	1,7

Dans les horizons correspondant aux matériaux, la fraction argileuse contient plus de 95 % de kaolinite. Dans les horizons B, elle n'en contient que 76 à 77 % seulement. L'échantillon HFA 19 intermédiaire représente dans le profil l'horizon C hétérogène de transition.

Cette évolution du bas en haut du profil correspond à une augmentation des quartz fins et des quantités de fer total dans la fraction inférieure à 2 microns. L'augmentation des quartz fin est sensible et il est logique de la rattacher au phénomène de la pulvérisation des quartz mis en évidence précédemment. La taille de ces derniers aurait donc tendance à diminuer dans toutes les classes granulométriques.

L'augmentation du fer est très élevée, puisque les teneurs passent de 1 à 10 %. Les horizons B sont donc caractérisés par une concentration du fer dans les fractions très fines du sol. PIAS (1968), sur le même type de sol au Tchad, avait précisé que le fer de la fraction argileuse pouvait atteindre 10 à 11 %. Il sera nécessaire, ultérieurement, d'étudier sous quelle forme se réalise cet enrichissement. En se référant à l'analyse mécanique, on note d'autre part que le rapport limon/argile, maximum dans l'horizon BC, décroît progressivement dans les horizons B. Ce n'est donc pas l'augmentation éventuelle de la fraction limon qui explique la variation de la composition globale.

Si l'on détermine, par le calcul, la composition de la fraction supérieure à 20 microns pour l'échantillon HFA, on constate qu'en plus du quartz, il y a des teneurs faibles en silice (2,8 %), en fer 0,4 %, et en titane 0,28 %. La presque totalité des hydroxydes de fer se trouve donc dans la fraction très fine ; En revanche un peu d'alumine pourrait se trouver dans les sables. LEPRUN était déjà arrivé à cette dernière conclusion (1967). Par rapport aux autres éléments, c'est le titane qui est le plus lié à la fraction sableuse (de l'ordre de 50 %). Il est donc intéressant de prendre cet élément comme invariant relatif, car il risque d'être moins mobile que les constituants de l'argile.

c) Conclusions

En définitive, il y a entre les roches-mères et les horizons B une modification de la composition de la fraction fine du sol, qui tend à s'enrichir en quartz et en hydroxydes, en particulier de fer.

La comparaison entre la kaolinite, calculée d'après les teneurs en alumine, et l'argile granulométrique est donc très intéressante. Mais il est net que l'utilisation des résultats des analyses granulométriques ne permet pas de tirer des conclusions sur le lessivage éventuel de kaolinite, mais plutôt sur celui d'éléments de taille inférieure à 2 microns. Or ces derniers contiennent parfois 10 % de fer. Le calcul de la kaolinite théorique n'est utilisable que pour définir une valeur approchée de la teneur en minéraux

argileux, compte tenu de l'existence éventuelle d'une certaine quantité d'alumine non combinée. Ce mode de calcul, possible pour ce qui concerne les horizons B, n'est pas à pratiquer pour les horizons C, sauf s'il est prouvé par d'autres méthodes qu'il n'y a pas d'alumine dans des structures différentes de celle de la kaolinite. Mais la prudence s'impose, car les rapports SiO_2/Al_2O_3 croissent progressivement au-dessus de 2,0 dans les roches-mères, et des minéraux altérables y sont décelables.

En conclusion, une faible augmentation du taux d'alumine totale entre C et B peut indiquer un faible enrichissement en argile kaolinique, mais n'exclut pas une augmentation sensible de la fraction granulométrique argileuse. Donc, quand il est possible de conclure à une argilification au sens donné à ce terme, il peut être erroné d'en déduire une importation de kaolinite par lessivage.

Nous distinguerons donc soigneusement kaolinisation et argilification. Cette dernière, augmentation de la fraction 0 à 2 microns, est un fait pédogénétique important, qui peut parfois être sous-estimé par la présence de pseudo-particules.

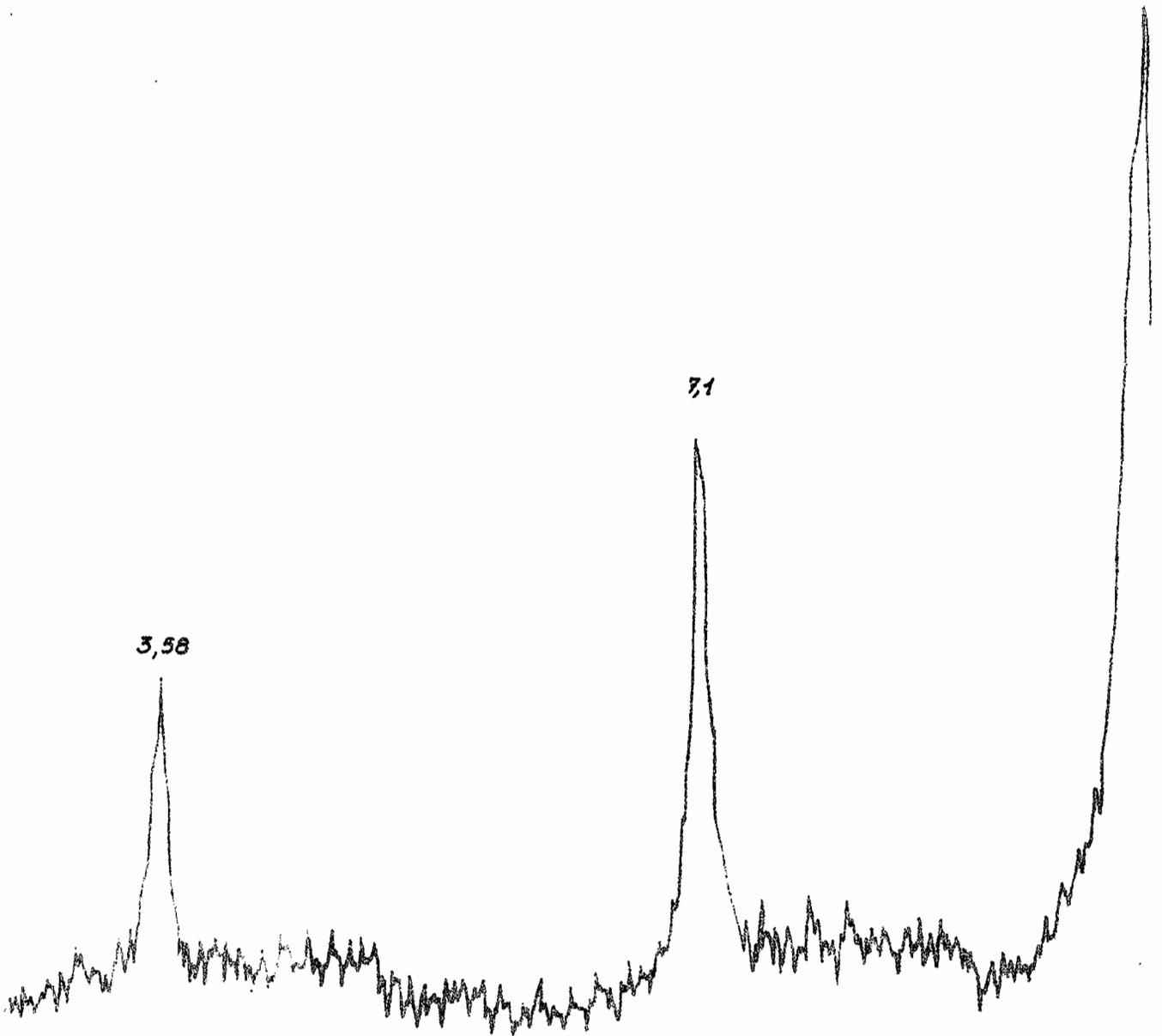
2.2 - Etat des minéraux argileux

De très nombreuses analyses par diffraction de rayons X ont été réalisées sur les sols rouges kaoliniques sur grès (interprétation selon LUCAS, CAMEZ et MILLOT, 1959). Elles ont toutes indiqué l'existence d'une kaolinite que Melle PAQUET considère comme particulièrement bien cristallisée (figures B 17 et B 18). Cependant, la comparaison des diagrammes successifs dans les profils indique que les pics sont systématiquement moins nets lorsqu'on se rapproche des horizons de surface. Ils diminuent de hauteur tout en restant aigus ; cette particularité caractérise un minéral bien cristallisé.

Deux possibilités d'explication ont été avancées :

- masquage par des produits amorphes divers
- diminution de la cristallinité de la kaolinite.

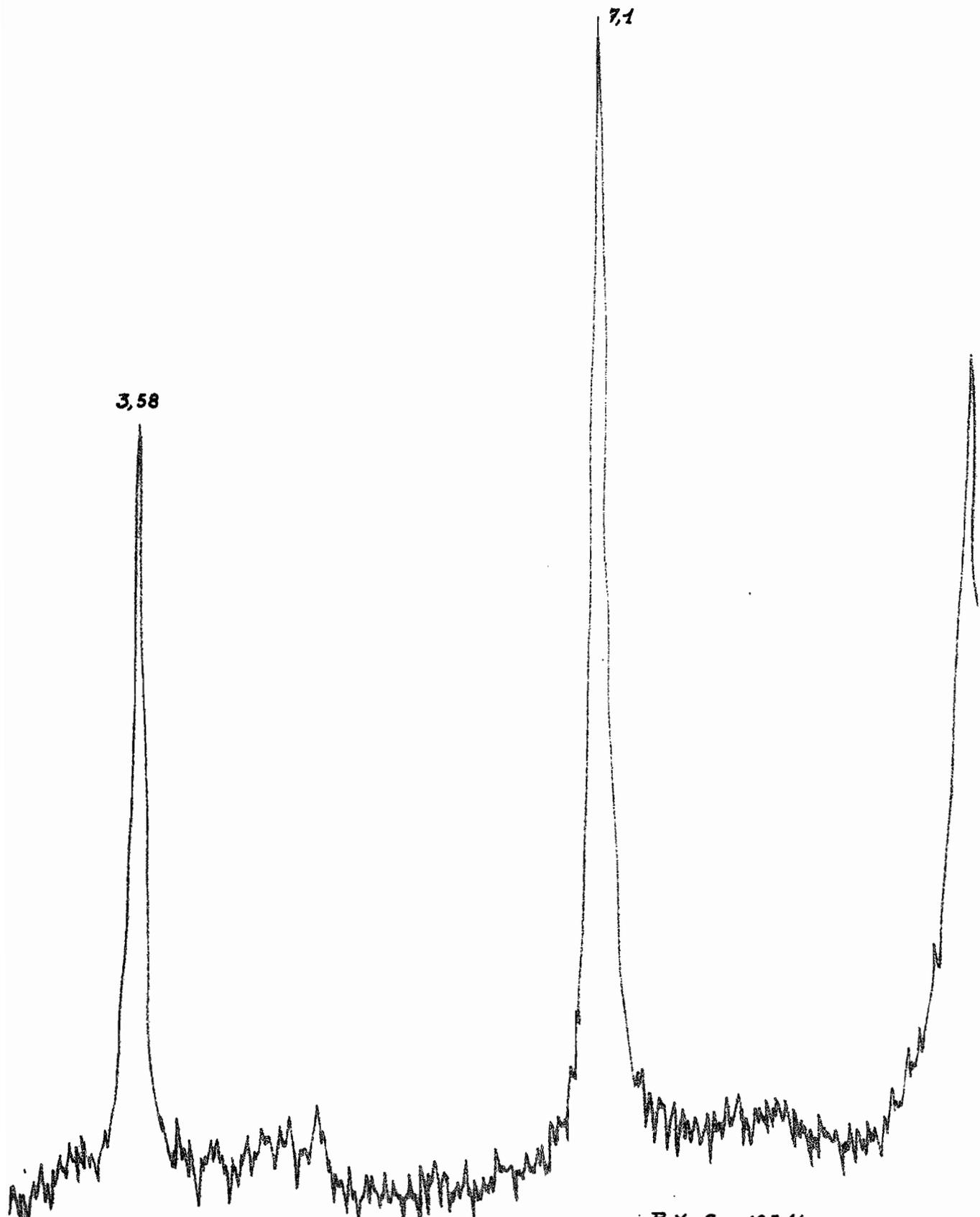
Fig. B17
MINÉRAUX ARGILEUX, HORIZON A
SOL ROUGE DE CASAMANCE (CA 131)



RX Cu 12314

Laboratoire de Géologie de Strasbourg

Fig. B 18
MINÉRAUX ARGILEUX, HORIZON B2
SOL ROUGE DE CASAMANCE (CA 135)



RX Cu 12314
Laboratoire de Géologie de Strasbourg.

a) Les produits amorphes

La présence de produits amorphes minéraux a été mise en évidence par la méthode de SEGALIN (1967 a). Dans les horizons A et B des profils étudiés en Casamance, en Haute-Volta et au Dahomey, un pourcentage relativement élevé de fer amorphe a été noté, avec une faible teneur en alumine amorphe ou du moins non cristallisée (ou crypto-cristalline ?). De même, dans les horizons supérieurs, des composés organiques amorphes existent vraisemblablement en proportion importante. Il est donc probable que la présence de ces composés doit influencer sur la réalisation des diagrammes RX.

Sur quelques prélèvements, nous avons tenté l'élimination de la fraction ferrugineuse amorphe par mise en contact avec de l'HCl 4 N, puis lavage à la soude 0,5 N. Effectivement, la qualité des pics aux rayons X s'est nettement améliorée. Dans une autre manipulation, afin de diminuer l'importance de la fraction amorphe mobile, nous avons effectué un lessivage continu par de l'eau sur un échantillon : CA 491. L'étude de cet échantillon lessivé a été faite dans les laboratoires de géologie du Professeur MILLOT à Strasbourg. Hélène PAQUET note qu'il comporte une kaolinite très bien cristallisée, dominante par rapport à un complexe 10-14 Å constitué essentiellement d'interstratifiés I - (10-14 C) - C avec des traces d'interstratifiés (14 C - 14 M). Il semble que ces édifices gonflants soient les restes d'illite altérées qui ont subsisté, même dans les horizons supérieurs. Surtout, le traitement à l'eau oxygénée a pour effet essentiel de mieux dégager les pics à 10 et 14 Å. PION (1966) avait également noté l'apparition de pics d'illite après avoir éliminé la matière organique, lors d'une étude sur la fraction fine transportée dans les eaux du Bandama (Côte d'Ivoire). Sur le profil HFA de Haute-Volta, l'examen au microscope électronique nous a effectivement montré des plaquettes d'illite, qui existaient dans les sables (HFA 20). Dans les horizons rubéfiés elles se retrouvaient, parfois sous forme de débris, entourés d'un cortex de fer (HFA 13). Ce masquage doit donc disparaître par déferrification. C'est effectivement ce qui a été observé dans les résultats exposés ci-dessus.

Une nouvelle opération de lavage à l'eau ayant été réalisée sur un autre échantillon CAA, la comparaison avant et après lessivage a confirmé l'amélioration de la qualité des diagrammes. Notons par ailleurs que ce lavage s'est traduit par un départ de produits minéraux et surtout organiques, comme des acides fulviques, qui ont été récupérés dans le filtrat.

b) La cristallinité de la kaolinite

La diminution éventuelle de la cristallinité de la kaolinite peut également être envisagée, bien que l'observation de la forme aigüe des pics la rende moins probable. En premier lieu, nous avons essayé de vérifier une évolution de taille, en effectuant des granulométries fines d'argile par la méthode de RIVIERE (1952). Elles ont prouvé que 60 à 80 % de la fraction argileuse (0 - 2 microns) se trouvent dans la classe inférieure à 0,5 microns. L'argile est donc de taille très petite, même dans les roches-mères (cf. figure B 19). Dans ces conditions il est difficile de déceler une évolution de taille de la kaolinite sous l'action de la pédogénèse, évolution qui aurait pu être corrélative d'une dégradation des minéraux. Elle n'est pas exclue cependant, mais nous n'avons pas pu réaliser de mesures de surfaces spécifiques pour la vérifier.

Les photographies de microscopie électronique nous ont donné un certain nombre d'indications complémentaires. D'une part, la présence de quartz et de grains de goethite se confirme dans la fraction argileuse des horizons B, alors qu'elle est rare dans celle des roches-mères. D'autre part, les particules observées les plus grandes se trouvent uniquement dans les matériaux originels. On peut en déduire une diminution progressive de taille des particules, ou tout au moins une fragmentation des plus grandes. Les cristaux sont généralement hexagonaux, et leur observation ne fournit pas d'indices d'une dégradation. Mais il est possible que la fragmentation continue des minéraux kaolinitiques, se termine par un passage des fractions les plus fines à l'état amorphe ou crypto-cristallin. Le processus est plus probable que celui d'une désorganisation des minéraux.

%
100

Fig B19 . COURBES GRANULOMÉTRIQUES

PROFIL CA 1
(BASSE CASAMANCE)

75

50

25

0

0,06 0,08 0,10 0,12 0,15 0,20 0,25 0,30 0,40 0,50 0,60 0,75 1 1,5 2 3 4 5 6 7 10 20 25 30 35 40 50 60 75 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 μ

ARGILES

SABLES

CA.D

CA.I

CA.B

CA.J

2.3 Conclusions

Compte tenu de ce qui précède sur la composition de la fraction 0 - 2 microns, voici ce que l'on peut conclure au sujet de l'argilification des horizons B des divers profils, dans les deux toposéquences :

- En Haute-Volta, la transformation de la roche-mère en horizon rubéfié se réalise par une très forte augmentation des teneurs en argile granulométrique, bien que la création de pseudo-particules la fasse parfois sous-estimer la valeur réelle. Elle se réalise, également, par une augmentation élevée, mais moins forte, des teneurs en aluminium, en fer et en titane totaux. Enfin, elle s'effectue par l'augmentation progressive des teneurs en quartz et en hydroxydes de fer, dans la fraction de taille inférieure à 2 microns.
- En Casamance, l'augmentation de la fraction argileuse déterminée par l'analyse mécanique, est moins élevée qu'en Haute-Volta. Elle est cependant systématique et significative. L'augmentation des quantités d'alumine, par unité de poids est un peu plus faible. La création de l'horizon B se traduit également par une légère augmentation en fer et en titane totaux.

Finalement, à partir de roches-mères très différentes dans les deux toposéquences, la pédogénèse a donc abouti à la création d'horizon B assez proches, sur les plans morphologiques et physico-chimiques. Cela nous incite à envisager l'existence d'un phénomène de convergence. Dans la mesure où les matériaux originels sont à dominance de quartz et d'argile kaolinique, la pédogénèse orienterait l'évolution vers un seul type de profil. Dans ce profil, l'équilibre entre quartz, hydroxydes et kaolinites serait bien précis, en liaison avec un réarrangement particulière, et corrélativement avec le développement de la rubéfaction. Cet équilibre expliquerait que les teneurs en éléments argileux, dans les horizons B, ne s'élèveraient que jusqu'à un taux maximum de l'ordre de 50 à 55 %. Mais pour essayer d'expliquer ce dernier seuil il faut analyser les différents mécanismes possibles de l'argilification.

3) Les mécanismes possibles de l'argilification dans les horizons B

L'argilification systématique des horizons B dans les sols "rouges" est un fait pédogénétique. Nous avons décelé une cause importante d'augmentation de la fraction granulométrique de 0 à 2 microns par intégration progressive dans cette fraction d'hydroxydes de fer, et de particules de quartz. Ce dernier phénomène est la conséquence de l'éclatement des sables lors de l'importation de composés ferrugineux. Supposons un milieu contenant 40 % d'argile kaolinitique, composée exclusivement de minéraux kaolinitiques. L'intégration de particules de quartz et de fer peut changer la composition de la fraction argileuse qui passe de 100 % de kaolinite à 80 % de kaolinite, 10 % de quartz et 10 % de fer. Dans ces conditions, une nouvelle analyse mécanique sur la terre totale indiquera une teneur de 45 à 47 % d'argile. Cette argilification de 5 à 7 % ne sera pas le résultat d'un lessivage d'argile, mais simplement celui d'une pulvérisation des quartz sur place et d'une importation de fer dans le milieu. Un simple lessivage de fer peut donc se traduire par une argilification sensible.

Par contre, l'argilification pourra être sous-évaluée par la création, dans les horizons B, de pseudo-particules à stabilité élevée. Avant de parler de lessivage et de classer les sols il est donc nécessaire de définir séparément l'importance des phénomènes : d'argilification, d'enrichissement en kaolinite et de pseudo-particulation. Mais il reste indéniable que l'argilification des sols rouges consiste, pour une part importante, en une augmentation des teneurs, par unité de poids en minéraux kaolinitiques. Il faut en rechercher les causes.

Les causes de l'enrichissement en kaolinite

Trois possibilités peuvent être retenues pour expliquer l'enrichissement d'un milieu en kaolinite.

a) enrichissement sur place par kaolinitisation des minéraux altérables.

b) enrichissement absolu par apports extérieurs :

- soit d'éléments de taille inférieure à 2 microns :
minéraux kaolinitiques.
- soit d'alumine sous forme ionique, de complexes ou de chélates, cette alumine se resiliçifiant en kaolinite en présence de silice libre.

c) enrichissement relatif par départ d'autres constituants :
la possibilité unique est un départ de la silice qui constitue l'élément essentiel des roches-mères.

Nous allons examiner ces différents mécanismes possibles, et discuter les arguments qui peuvent les justifier ou les rendre improbables. Cela nous amènera à poser un certain nombre de questions, ou de problèmes, que nous nous efforcerons d'élucider dans la suite du mémoire.

3.1 - Transformation des minéraux altérables

Outre la kaolinite existant dans les roches-mères, on trouve des minéraux altérables contenant de l'alumine qui peuvent éventuellement se kaolinitiser. Cette possibilité est quantitativement limitée, car dans leur état actuel les roches-mères sous les sols (ou latéralement) sont très pauvres en éléments altérables. Les grès de Haute-Volta contiennent cependant quelques feldspaths, ceux de Casamance un peu d'illite altérée, mais les analyses totales n'ont jamais révélé que des quantités peu importantes d'alumine non kaolinitisée.

Afin de préciser ce point nous avons comparé les résultats de l'analyse triacide à ceux d'une fusion alcaline par CO_2 K Na. Le tableau B 13 ci-dessous démontre que l'analyse triacide suffit pour l'étude des matériaux contenant essentiellement de la kaolinite et des hydroxydes. La correspondance entre les chiffres fournis par les deux méthodes est d'ailleurs remarquable. C'est à partir de ces données que nous avons utilisé le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pour effectuer les calculs. SEGALEN (1954) et PEDRO (1966) ont insisté sur l'intérêt de ce rapport, mais LENEUF (1959)

a montré les limites de son utilisation. Nous l'avons donc utilisé uniquement pour prouver la présence de la kaolinite. Rappelons que c'est parce que ce rapport est toujours voisin de 2,0 que les sols rouges sur grès ont été initialement classés comme faiblement ferrallitiques (AUBERT, 1963 ; SEGALEN, 1966 a).

TABLEAU n° B 13 - Comparaison des méthodes triacides et fusion alcaline

Méthode	Aluminium		Fer		Titane	
	Triacide	Fusion	Triacide	Fusion	Triacide	Fusion
CA 411	2,8	2,9	1,20	1,15	0,40	0,38
429	18,30	18,25	4,75	4,65	1,38	1,20
433	18,0	17,8	5,0	5,0	1,36	1,41
436	17,5	17,3	5,25	5,25	1,35	1,30
438	17,0	17,0	5,0	5,0	1,31	1,41
HFB 17	7,75	7,85	2,10	2,0	0,45	0,40
HLA 49	19,5	19,25	6,0	6,0	1,10	0,98

Analyses réalisées au Laboratoire de Chimie des SSC de Bondy

En définitive, la kaolinitisation de minéraux altérables ne représente qu'un apport négligeable dans le bilan de l'évolution, et les résultats de l'analyse triacide peuvent être utilisés pour calculer les teneurs en kaolinite dans les horizons B des sols "rouges".

3.2 - Importations d'éléments particuliers de la taille des argiles.

L'importation d'argile est généralement considérée comme le résultat du lessivage, dans la mesure où ce dernier est défini comme une migration de particules solides. De nombreux auteurs pensent que cette migration est importante : AUDRY, (1967) ; BOCQUIER, (1967) ; MAIGNIEN, (1968) BRABANT, (1968). D'autres comme BONFILS, CHARREAU et MARA (1963), puis ROOSE (1968 b) recueillent effectivement de l'argile à la base de profils de sols tropicaux kaolinitiques.

Deux faits permettent d'envisager ce mécanisme dans le cas des sols "rouges" de l'étude :

- la présence d'horizons supérieurs toujours plus pauvres en argile que les horizons B, quelle que soit la position topographique, ce qui pose le problème du devenir de cette argile.
- la constatation d'un enrichissement relatif en argile des pseudo-particules, ce qui peut se concevoir par un enrichissement progressif des pseudo-sables en constituants argileux. Par contre, il y a rarement des revêtements argileux bien caractérisés.

Les argiles importées sont essentiellement de la kaolinite, mais il y a aussi d'autres éléments très fins, des quartz ou des hydroxydes divers. Admettant que l'enrichissement en argile d'un horizon B puisse provenir du lessivage d'horizons supérieurs, ou situés en amont, nous avons calculé ce que devaient être les horizons d'où provenait cette argile. Nous avons pris comme base un horizon B de six mètres de profondeur.

En Casamance, l'argilification relative entre C et B est faible. L'épaisseur qui aurait été théoriquement appauvrie est à peine plus épaisse que celle des horizons appauvris actuellement observables sur le terrain. On peut admettre l'érosion superficielle d'une partie de ces horizons après leur appauvrissement pour corriger les différences d'épaisseur.

Par contre, pour le profil HFA de Haute-Volta, compte tenu de la nature très sableuse des roches-mères, les horizons supérieurs d'où proviendrait l'argile représenteraient 90 mètres d'épaisseur. Il s'agit d'un calcul théorique, établi en ramenant à la même verticale toutes les pertes, et en négligeant les décapages complémentaires par érosion.

Ce chiffre, bien que très élevé, ne doit pas être rejeté d'office. En effet, sur ces grès d'âge primaire, on peut envisager une translation progressive, verticale et oblique, des éléments argileux au cours du temps.

Selon les vitesses relatives du lessivage des horizons, situés au sommet du profil ou en amont dans la toposéquence, selon la vitesse de descente du front d'argilification vers la profondeur, enfin selon la vitesse des phénomènes d'érosion et de remaniement superficiel, il nous semble possible que la résultante puisse être une concentration progressive des horizons B en argile.

Cette hypothèse peut se formuler autrement : au départ, la surface initiale du sol devait être au moins à 90 mètres plus haut qu'actuellement. Ensuite, les cycles successifs de pédogénèse et de morphogénèse, qui ne sont d'ailleurs pas toujours séparés dans le temps, se sont traduits par une concentration relative d'éléments, en particulier de kaolinite, dans les horizons B. Cette concentration s'est traduite aussi par l'augmentation continue de l'épaisseur de ces horizons. Il y aurait eu, au cours des temps, descente progressive d'un front d'argilification et d'un front d'appauvrissement dans l'ensemble de la toposéquence. L'épaisseur des horizons B refléterait donc, non seulement une intensité, mais surtout une durée de la pédogénèse.

Ce mécanisme est d'autant plus concevable, qu'aux enrichissements en alumine et en kaolinite, il faut ajouter un enrichissement presque du même ordre en hydroxydes de fer. De plus, les méthodes micromorphologiques confirment que l'enrichissement progressif de la matrice argileuse se réalise en même temps que celui du fer autour du squelette quartzeux. Cette observation indique une réorganisation, donc une possibilité de mouvement. Certains auteurs (HILL, 1968) ont d'ailleurs décrit des cutanes de revêtement en Gambie, où des surfaces luisantes au Dahomey (SOGETHA, 1962).

Comme la porosité des horizons B est bonne, et ne semble donc pas avoir été modifiée par un bourrage d'argile importée, celle-ci se serait fixée systématiquement sur les pseudo-sables agissant comme des pièges. DIJKERMAN, CLINE et OLSON (1967) envisagent que ces pièges puissent être, dans les premiers stades de l'accumulation, de simples discontinuités texturales du matériel parental, avec pour effet une rétention mécanique de

l'argile par filtrage. Il y aurait donc accumulation préférentielle d'argile sur les discontinuités que sont les éléments nouveaux de la granulométrie. Ce phénomène se déclencherait dès les horizons C. Il a été en effet démontré, dans le cas des sols sableux, que les horizons C se transformaient progressivement en horizons B par création de nodules plus argileux, mais aussi plus riches en fer, dans la masse des sables quartzeux. Cela revient à dire que le front d'argilification serait discontinu, alors que le front d'appauvrissement serait continu.

En conclusion, cet ensemble cohérent d'arguments indique qu'il y a effectivement déplacement de l'argile et que l'argilification des horizons B lui est due en partie. Il reste cependant à vérifier la réalité du départ des particules hors des horizons supérieurs, ainsi que son importance relative.

3.3 - Importation d'alumine

L'argilification expliquée cette fois par importation d'alumine supposerait que les conditions suivantes sont réunies :

- libération d'alumine
- transport de cet alumine sous une forme stable
- recombinaison de la plus grande partie de l'alumine avec de la silice pour former de la kaolinite.

Nous examinerons ces différents points successivement.

a) Libération d'alumine

Diverses méthodes ont été employées pour mettre en évidence de l'alumine libre : analyse triacide, détermination des amorphes par la méthode SEGALEN, recherche d'hydroxydes cristallisés (analyses RX et ATD).

Les rapports SiO_2/Al_2O_3 déduits des résultats de l'attaque triacide sont compris entre 1,8 et 2,1 pour la terre fine (0 - 2 mm) et de 1,9 à 2,0 pour la fraction 0 à 2 microns. Théoriquement, le rapport légèrement inférieur à 2,0 indiquerait un léger déficit de silice et la présence le plus

souvent de 2 à 3 % d'alumine sous forme non combinée. Mais la méthode triacide peut libérer un excès de silice (CLAISSE, 1968) ce qui ne permet pas de conclure avec sécurité.

L'utilisation de la méthode préconisée par SEGALEN (1967) indique que les teneurs en aluminium amorphe sont faibles (voir figure B 20). Pour le profil CAA, les teneurs croissent de 0,1 % en surface à un maximum de 0,4 % en profondeur, où l'aluminium total triacide dépasse cependant 12 %. Pour le profil A de la toposéquence de Casamance, les teneurs sont de 0,1 % dans les horizons A et B, et seulement de 0,04 % dans les horizons C. Les résultats sont du même ordre en Haute-Volta, où cependant, pour certains horizons, on note des valeurs nulles. Au Tchad, PIAS (1968) met également en évidence la présence de quantités faibles d'alumine non combinée (alumine amorphe et gibbsite).

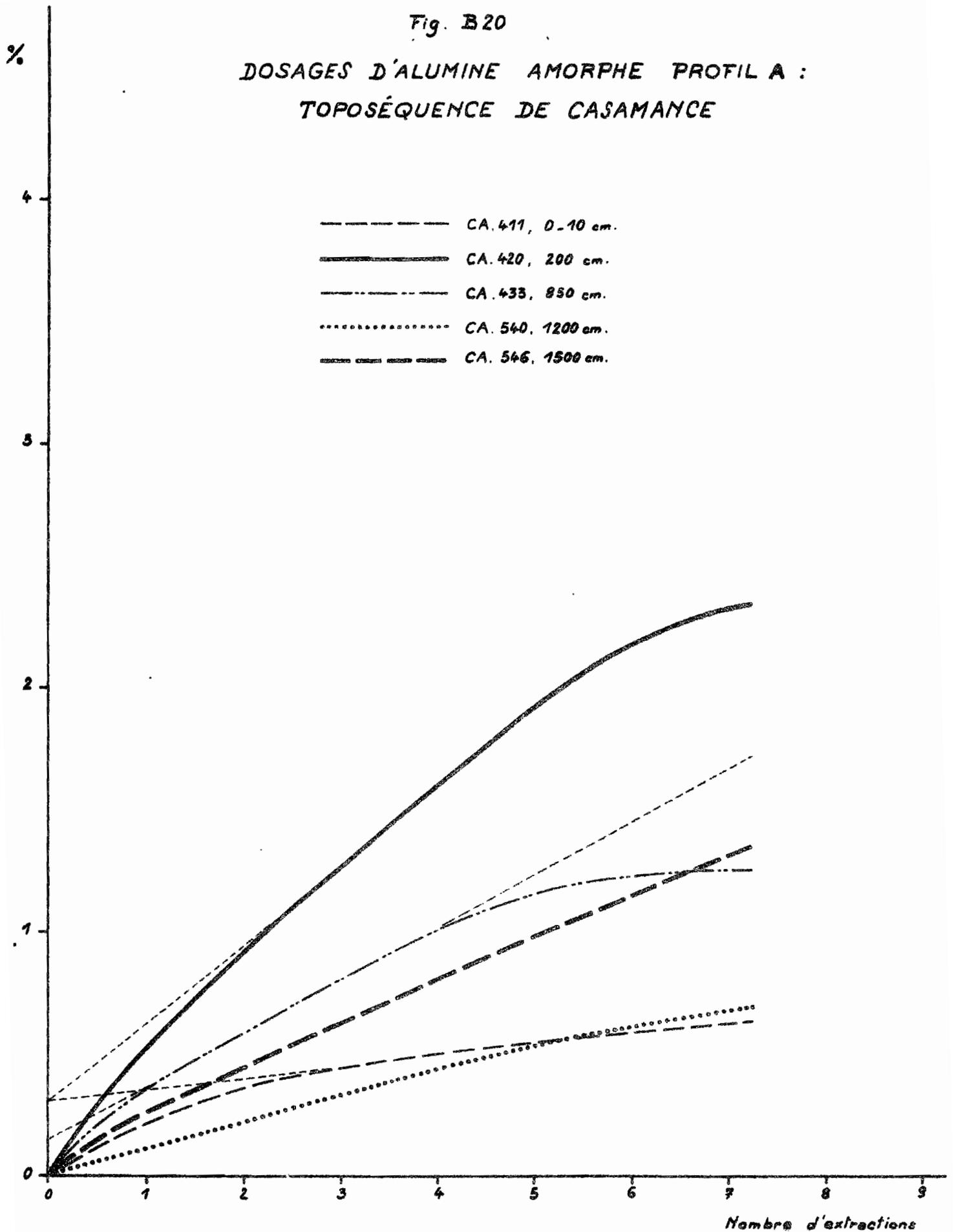
Il est donc possible de conclure à la présence probable d'alumine non combinée, mais en quantités toujours faibles. Cette alumine ne serait pas cristallisée, car il n'a jamais été mis en évidence ni de gibbsite ni de boehmite par les méthodes physiques. Cependant, les quantités étant très faibles, les pics ont pu ne pas être enregistrés.

b) Mobilisation de l'alumine

De nombreux auteurs ont admis la possibilité de migration de l'alumine. Elle se ferait surtout sous forme de chélates, car sous forme d'ions cette migration serait très courte (SEGALEN, 1964). Dans ces conditions c'est dans les horizons organiques que le phénomène se déclencherait. La réalité d'une libération d'alumine dans les horizons supérieurs, l'origine de cet alumine, et les conditions de sa libération et de son transport, seront donc des questions à reprendre au chapitre traitant du passage des horizons B aux horizons A.

Fig. B20

DOSAGES D'ALUMINE AMORPHE PROFIL A :
TOPOSÉQUENCE DE CASAMANCE



c) Silicification de l'alumine

La resilicification de l'alumine suppose préalablement la dégradation des complexes ou chélates au niveau des horizons B, puis ensuite la recombinaison de Al avec de la Si solubilisée.

La possibilité de resilicification de l'alumine a été admise par de nombreux auteurs. Dans une mise au point SIEFFERMANN (1969) cite en particulier : De LAPPARENT, (1939) ; HARDY et RODRIGUES (1939) ; GOLDMAN et TRACEY (1946) ; CARROL et JONAS (1947) ; GORDON (1952) ; FIELDS (1952). Cependant, la plupart de ces auteurs parlent de gibbsite, c'est-à-dire de la forme cristallisée, qui n'a pas été mise en évidence dans cette étude. La même conclusion sur la resilicification a été avancée plus récemment par SIFFERT (1962). Dans le cas des sols ferrallitiques, DELVIGNE (1965), considère que la synthèse se réalise dans les horizons tachetés à mauvais drainage. La silicification de l'aluminium est admise également par LELONG (1968) et par TARDY (1969). Ce dernier auteur déclare qu'à la base des sols ferrallitiques, il y a une zone où la concentration en silice croît dans les solutions du sol en saison sèche, ce qui favoriserait la kaolinisation de l'alumine, dont les chélates doivent se détruire peu à peu. SIEFFERMANN (1969), conclut également à la réalité de la kaolinisation après dégradation des complexes liés à Al. La kaolinite créée serait d'autant mieux cristallisée que le milieu est fortement désaturé (MILLOT, 1964). PEDRO et LUBIN (1968) confirment la réalité de la kaolinisation par les méthodes de laboratoire. Les minéraux kaoliniques qu'ils obtiennent sont alors de taille très fine. SIEFFERMANN (1969) précise aussi que la kaolinite synthétisée avoisinerait la taille de 0,1 micron, ce qui correspond à celle que nous avons déterminée précédemment dans les sols de Casamance.

Cependant, cette resilicification de l'alumine libérée nous semble plus déduite indirectement par les auteurs que prouvée analytiquement. La présence d'un peu d'alumine amorphe dans la plupart des profils que nous avons étudié permet cependant de la retenir comme plausible. MILLOT (communication personnelle) indique qu'on se trouve dans un équilibre thermodynamique où le quartz se dissout, tandis que la kaolinite

est stable. Elle peut donc croître par combinaison de la silice ambiante et de l'alumine importée. La silice ambiante provient à la fois d'une migration à partir des horizons supérieurs, mais surtout de l'attaque des quartz mise en évidence précédemment.

Notons qu'une importation de 16 grammes d'alumine peut se traduire par la formation de 40 grammes de kaolinite. Il est aisé de calculer dans ce cas que l'importation de 1 gramme d'alumine dans 100 grammes de sol, si ce dernier contient 20 % d'argile granulométrique, se traduirait par une augmentation de plus de 2 % de la teneur en argile, si la silice recombinaée était extraite sur place.

d) Conclusions

Bien que toutes les données précédentes permettent de retenir comme plausible une argilification par kaolinisation d'alumine importée dans les horizons B, on peut se demander dans quelle mesure ce phénomène peut expliquer l'enrichissement des profils de Haute-Volta, où le gain d'alumine par unité de poids est de 16 %. Comme les teneurs en alumine amorphe, que l'on peut, en première approximation, considérer comme susceptible d'être mobilisée, sont peu élevées, l'importance de ce phénomène est probablement faible. Dans les horizons de surface, seule la mise en évidence analytique d'un départ de chélates-Al, peut donner une réponse à ce problème. Ce point retiendra donc notre attention dans le chapitre sur la différenciation des horizons supérieurs.

3.4 - Exportation de silice

L'étude des quartz a suggéré la possibilité d'une libération de silice. D'abord, la pulvérisation des quartz atteint non seulement les grosses tailles, mais aussi les très fines, ce qui laisse supposer une disparition complète de certains cristaux. Ensuite, les états de surface, les cupules, les caries, sont l'indice d'une désorganisation des cristaux et d'un départ probable de substance. Mais l'étude des horizons C nous apporte des éléments nouveaux sur cette question.

3.4.1 - Etude des horizons C

Rappelons au préalable que les horizons C sont hétérogènes. La mise en place progressive de noyaux argileux se fait de façon discontinue, avec modification de la granulométrie des sables. Le front d'argilification ainsi défini suppose donc l'importation dans le milieu d'argile et de fer. Peu à peu l'envahissement est complet. Ainsi, en Haute-Volta, un niveau contenant 90 % de quartz et 10 % d'argile devient latéralement un horizon contenant 50 % de quartz et 50 % d'argile granulométrique et de fer. Dans le cas où l'importation est le seul mécanisme en cause, cela revient à réaliser un véritable bourrage autour d'un même squelette. Ce bourrage consisterait à importer 90 grammes d'argile autour des 90 grammes de quartz initiaux, ce qui augmenterait théoriquement la densité du milieu par 1,8. Quelques densités de matériaux et de sols ont été effectués. Leur nombre est insuffisant pour pouvoir tirer des conclusions définitives. Cependant, l'augmentation de densité trouvée en passant des horizons C aux horizons B n'est jamais très élevée, et surtout, elle n'est jamais en rapport avec un coefficient de l'ordre de 1,8. A l'examen micromorphologique, il y a effectivement remplissage des vides de la roche-mère par de la matrice. Mais, à l'observation optique, il y a également une diminution apparente de la surface occupée par les quartz.

Ces diverses observations suggèrent donc qu'un départ important de silice a eu lieu. Mais l'examen des répartitions dans les horizons C des éléments totaux, Fe, Si, Al et Ti nous fournit une preuve complémentaire.

a) En Haute-Volta

En utilisant la méthode des profils latéraux, on obtient les résultats suivants, que le tableau B 14 met en évidence pour trois couples, situés à trois niveaux différents : a) HFA 21 et HFB 7 - b) HFA 26 et HFB 11 - c) HFA 18 et HFB 4.

TABLEAU B 14 - Comparaison de couples latéraux des horizons C - B en Haute-Volta.

	HFA 26	HFB 11	HFA 21	HFB 7	HFA 18	HFB 4	HFA 18 "corrigé"
Ti	0,01	0,82	0,01	0,80	0,45	0,85	0,85
Al	1,15	15,25	2,0	16,00	7,50	14,25	14,25
Fe	0,05	4,25	0,10	5,50	2,00	3,25	3,80
Si	2,70 ?	19,15	5,05	20,95	9,75	19,10	18,5
Quartz	95,05 ?	54,70	92,45	50,45	80,0	62,0	
Horizons	C	BC	C	B 2	C	B 2	

- les teneurs en titane augmentent fortement de C vers B. Cet élément est cependant considéré comme peu mobile, et cela d'autant moins que plus de 50 % sont présents dans la fraction sableuse. Ainsi, les teneurs en titane, passent de 0,01 % à 0,8 % puis même 1 % dans les horizons B 2.

- les augmentations des trois éléments Fe, Ti et Al restent sensiblement proportionnelles entre elles.

Il est peu probable que ces trois éléments soient importés, par lessivage, en quantités exactement proportionnelles, sauf s'ils transitent à l'état lié. Cela peut effectivement être le cas pour l'argile et le fer. Mais, pour le titane qui se trouve en grande partie dans la fraction sableuse, il est difficile d'admettre un tel type de déplacement. Le mécanisme d'enrichissement relatif sur place, par contre explique facilement ces résultats.

Cependant, les rapports Fe/Al , Fe/Ti , et Al/Ti ne sont pas exactement constants. Ainsi, pour le couple HFA 18 - HFB 4 il est possible de corriger les chiffres de HFA 18 en les ramenant aux taux d'alumine de HFB 4 (Tableau n° B 14). Ti est alors au même niveau que dans HFB 4. Mais pour le Fe il y a un léger déficit, comme si une partie de cet élément avait migré vers la profondeur. Par contre, plus haut dans le profil, des résultats

légèrement différents ont été trouvés : le fer est en excès dans l'horizon B par rapport à ce qu'il devrait être si on retient uniquement l'enrichissement relatif par départ de silice. On en déduit que le fer, et peut-être l'aluminium et même le titane, ont une certaine mobilité, masquée par celle de la silice.

e) En Casamance

TABLEAU n° B 15 - Profils latéraux des horizons C à B en Casamance.

	Profil latéral I			Profil latéral II	
	544	463 - 464	487 - 488	541	460
Fe/Al	0,28	0,43	0,36	0,27	0,26
Fe/Ti	3,4	5,3	4,5	3,5	3,3
Al/Ti	12,0	12,2	12,2	12,8	12,5
Horizons	C	BC	B	C	BC

Le rapport le plus constant est Al/Ti, et une concentration sur place des deux éléments est donc possible. Le Fe, par contre, est plus mobile, et son importation dans le milieu est probable à certains niveaux. Précédemment le tableau n° B 11 nous avait présenté les variations en valeur absolue de Fe, Al et Ti. Les augmentations y sont de 10 à 20 %. Elles sont faibles car les matériaux originels sont des grès argileux, et il est donc plus délicat de conclure à un enrichissement relatif par départ de silice. Cependant l'augmentation systématique des teneurs en titane sur les profils latéraux rend plausible cette hypothèse. Les départs de silice seraient évidemment nettement plus faibles qu'en Haute-Volta.

3.4.2 - Conclusions

L'argilification par un mécanisme d'exportation de silice extraite des quartz est prouvée par de nombreuses observations, et par une série de résultats analytiques. L'enrichissement relatif qui en résulte est variable selon la position dans le profil et selon les carac-

téristiques des matériaux originels. C'est dans les horizons C que le phénomène de désilicification est le plus apparent et où, probablement, il a le plus d'intensité, puisque c'est la zone privilégiée de morcellement des quartz. C'est dans le cas de roches-mères sableuses que l'importance du mécanisme est la plus élevée.

Pour évaluer cette importance, envisageons l'hypothèse selon laquelle l'enrichissement relatif est le mécanisme unique. Dans l'exemple le plus typique (profil latéral HFA 18 - HFB 4), tandis que les taux d'argile granulométrique de l'analyse mécanique passent de 17,3 à 32,1 % les teneurs en quartz diminuent de 80 à 62 % en valeur relative. Le calcul montre que la transformation représente une diminution du total initial des quartz de 152 grammes à 62 grammes, soit presque 60 %. Une telle perte de matière représente, au niveau des horizons C, une diminution de poids de l'ensemble du sol de 47 %. On conçoit alors la possibilité de tassements importants. Dans l'exemple de la Casamance, l'augmentation "latérale" du titane de 10 à 20 % permet d'évaluer à 20 ou 25 % la diminution du stock initial des quartz.

Mais de nombreuses preuves indiquent qu'il y a toujours un enrichissement absolu par importation d'Al et surtout de Fe. En particulier le fait de constater une réorganisation en pseudo-sables suppose un minimum de déplacements. De plus, la morphologie du front d'argilification ne peut s'expliquer que par l'arrivée d'une partie de l'argile et du fer dans les horizons C. Enfin, c'est l'arrivée du fer qui provoque le déplacement de silice, puisque c'est lui qui déclanche, ou accélère, la fragmentation des quartz.

Il est assez difficile de préciser la part relative des deux types d'argilification créant les horizons B, car le titane n'est pas forcément stable. Cependant, il est évident que les dépôts de silice peuvent jouer un rôle important. On a vu que dans certains cas très favorables les horizons C pourraient perdre plus de 50 % de leur stock initial de quartz. Ces horizons C sont donc une zone de transit du fer, de l'argile, et de la silice, la mobilité de cette dernière étant justement déclanchée par l'arrivée des hydroxydes de fer de la fraction granulométrique argileuse.

En définitive, c'est la dynamique de la silice qui joue le rôle essentiel dans la transformation des horizons C sableux en horizons B. Il est maintenant nécessaire de préciser les mécanismes et les conséquences de cette dynamique.

4) La dynamique de la silice

De nombreux auteurs ont insisté sur la présence de silice à l'état soluble, ou à l'état amorphe, dans les sols et dans les eaux, en particulier ALEXANDER, HESTON et ILER (1954), ACQUAYE et TINSLEY (1965), MITCHELL, FARMER et HARDY (1964).

Mais envisager la dynamique de la silice revient à étudier non seulement les possibilités de libération, puis de mise en mouvement de la silice, mais aussi le devenir de cet élément.

4.1 - La libération de la silice

Dans le cas des sols "rouges", la silice peut être libérée à partir des constituants suivants :

- soit des minéraux primaires altérables
- soit du quartz
- soit de la kaolinite.

4.1.1 - La libération à partir de minéraux altérables

La libération à partir des minéraux altérables est classique et de nombreux auteurs l'ont étudiée dans les régions tropicales : DELVIGNE (1965), LENEUF (1959), LENEUF et AUBERT (1960). Tous concluent à des départs extrêmement importants hors des profils pédologiques, et les chiffres varient de 50 à 90 % du total de la silice initialement combinée. Ce départ considérable de silice est considéré comme un des critères essentiels de la ferrallitisation, et EHRART (1956), dans sa théorie sur bio-rhexistasie, insiste sur l'importance de la phase migratrice silicieuse. PEDRO (1964) a confirmé par voie expérimentale que ce départ de silice se réalisait sur la plupart des roches-mères. Mais il n'a pas réalisé de

manipulations particulières sur des roches gréseuses. PEDRO et LUBIN (1968) précisent d'autre part que le facteur fondamental est le drainage, quelle que soit la teneur initiale du matériau en silice. Cependant, les minéraux altérables sont rares dans les roches-mères que nous étudions et les dépôts possibles de silice sont donc presque négligeables.

4.1.2 - La libération à partir du quartz et de la kaolinite.

Deux autres sources de silice existent : le quartz et la kaolinite.

De nombreux auteurs admettent la désilification à partir du quartz : CLAISSE (1968), LEVEQUE (1966), LENEUF (1959 et 1966), SEGALEN (1966 b). LENEUF note des cas de diminution de poids des quartz, tandis que SEGALEN rappelle la lenteur du phénomène. Récemment ROSSE et BIROT (1970) déclarent que dans les sables tertiaires de Côte d'Ivoire la silice des eaux de percolation ne peut provenir que du quartz. D'autres chercheurs, par contre, insistent sur l'importance de la libération de silice, dans les sols ferrallitiques, à partir de la dégradation de la kaolinite (LELONG, 1968).

La désilification à partir des quartz est souvent mise en rapport avec la présence d'ions étrangers, surtout du fer : ALIMEN et DEICHA (1958) parlent de phénomènes de substitution et de consolidation. WANNESON (1968) souligne que les grains corrodés perdent de la silice, qui est remplacée par des ions étrangers, et que la solubilité du quartz est plus fonction de ces ions que du pH. WACKERMANN (1968) indique que la désorganisation apparente des quartz se réalise essentiellement en présence de composés ferrugineux. BOURGEAT (1970) décrit, à Madagascar, la dissolution des grains de quartz dans des sols ferrallitiques riches en fer.

Il est nécessaire d'utiliser les travaux des chimistes sur la solubilité de la silice. En se référant aux mesures expérimentales et aux calculs thermodynamiques (SIEVER, 1957 et 1962 - KRAUSKOPF, 1959 - WEY et SIFFERT, 1961 - SIFFERT, 1962) la solubilité du quartz serait de 6 à 7 ppm

en SiO_2 , celle de la silice colloïdale étant de 120-140 ppm de SiO_2 à 20-25°C. Ces données ont été appliquées par MILLOT (1960 et 1964) aux problèmes des silicifications et des néoformations des minéraux argileux en géochimie de la Surface. Depuis, la dissolution de la kaolinite a été étudiée : la solubilité de la silice de la kaolinite est de 1,25 ppm en SiO_2 (WOLLAST, 1963, GARRELS et CHRIST, 1967).

Récemment MILLOT et FAUCK (1970) ont utilisé ces données pour rendre compte des équilibres dans les sols à kaolinite. Le diagramme d'équilibre gibbsite-kaolinite-quartz-feldspath K-solution à 25°C et 1 atm est présenté à la figure B 21. En abscisse sont portées les teneurs en silice dans la solution ; en ordonnée, le rapport des concentrations, $\left[\text{K}^+ \right] : \left[\text{H}^+ \right]$. Cette figure est limitée au domaine occupé par les solutions des sols ferrallitiques.

- L'équilibre kaolinite-gibbsite est représenté par la droite (a). Il est réalisé par une valeur fixe de la teneur en silice, environ 1 ppm de SiO_2 , en solution vraie. En dessous de cette valeur, il y a dissolution de la kaolinite qui laisse un résidu de gibbsite et libère de la silice en solution.

- L'équilibre quartz-solution est représenté par la droite (b). Il est atteint pour une valeur de 6 ppm de SiO_2 en solution. En dessous de cette valeur, le quartz se dissout.

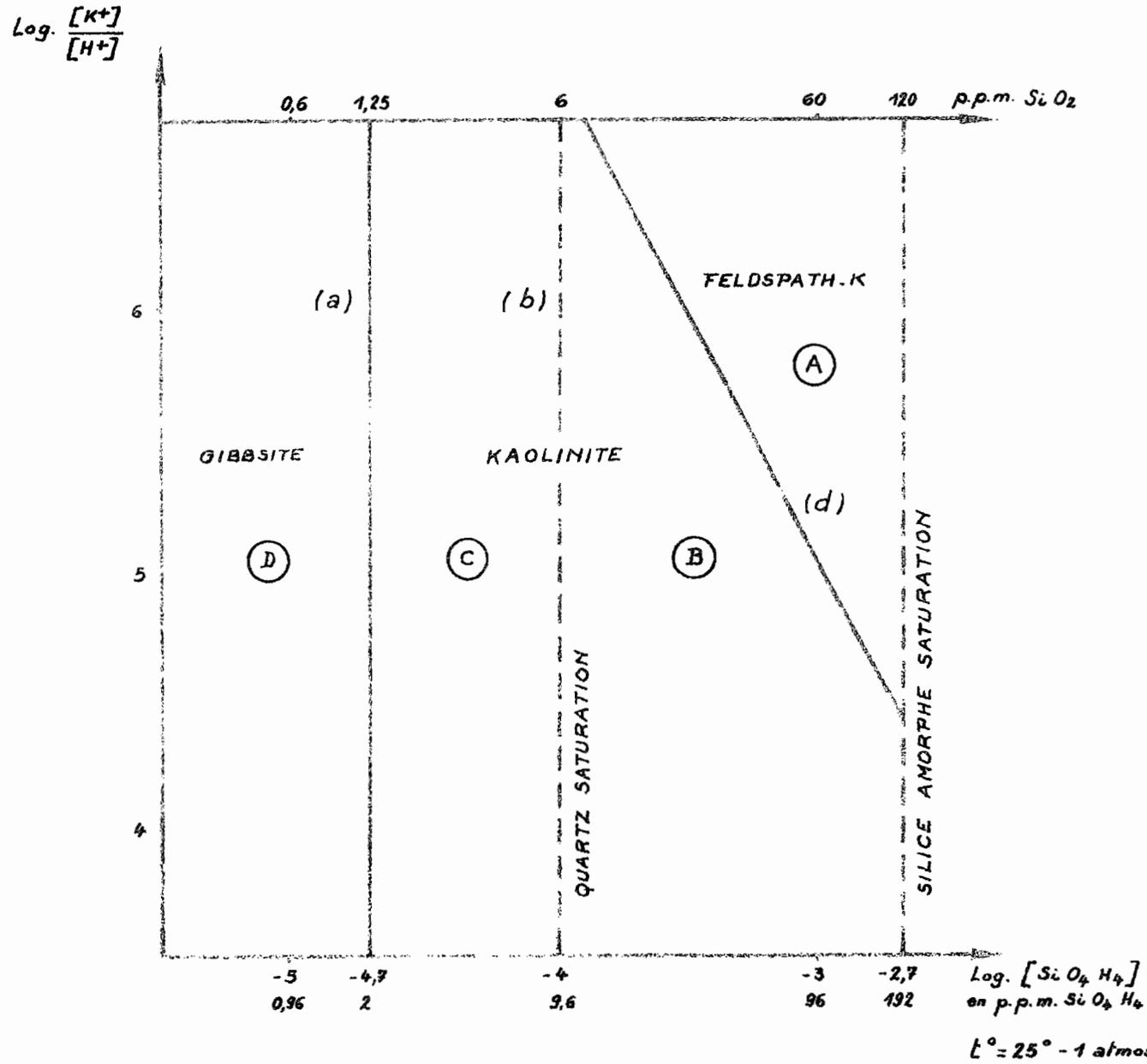
- L'équilibre silice amorphe-solution est connu depuis longtemps, pour un seuil de solubilité de 120 ppm de SiO_2 . C'est la droite (c).

- L'équilibre feldspaths K-kaolinite est représenté par la droite (d) inclinée sur l'axe des abscisses. La teneur de la silice en solution varie de 12 à 120 ppm selon les valeurs de concentrations en ions K^+ et H^+ .

Ces quatre droites délimitent quatre espaces : A, B, C, D. L'espace A correspond à la stabilité des feldspaths potassiques et du quartz. Ces minéraux ne sont pas altérés. L'espace B correspond à l'altération du feldspath potassique en kaolinite et à la stabilité du quartz. L'espace C correspond à l'altération simultanée du feldspath et du quartz. Ce cas est

Fig. B21

DOMAINES DE STABILITÉ DE LA GIBBSITE, DE LA KAOLINITE, DU QUARTZ
ET DU FELDSPATH .K VIS A VIS DE LA SOLUTION AQUEUSE DE SILICE



réalisé pour des teneurs en silice inférieures à 6 ppm. Si le feldspath est présent, la cinétique de l'altération du quartz est freinée, et celui-ci s'altère peu. Si le quartz est seul, la vitesse de réaction est hâtée. L'espace D correspond à l'altération de la kaolinite en gibbsite pour des teneurs inférieures à 1 ppm de SiO_2 .

Dans le cas des sols rouges, les feldspaths et autres minéraux silicatés ont pratiquement disparu dans les horizons C et B. La grande perméabilité des matériaux sableux ou argilo-sableux à pseudo-sables doit permettre la baisse des teneurs en silice en dessous de 6 ppm, à certaines époques de l'année. Lors de l'hivernage surtout, et à condition que la pluviométrie dépasse un certain seuil pour qu'il y ait suffisamment de percolation, le quartz peut se dissoudre. Mais l'abondance de cet élément interdit de tomber en dessous du seuil de 1 ppm. C'est ce qui explique que la gibbsite n'apparaît pas dans les horizons profonds des profils, horizons les plus riches en quartz. Pourtant dans les horizons supérieurs, il y a parfois présence de faibles quantités d'alumine. Mais, ce sont les horizons qui reçoivent la quantité maximum d'eau de pluie. Les possibilités de percolation sont en effet les plus élevées près de la surface des sols. A certaines périodes très humides de l'année les teneurs en silice y descendent sûrement en dessous du seuil de 1 ppm. La kaolinite pourrait alors se dégrader et libérer de l'alumine et de la silice. C'est une question qui sera reprise ultérieurement, au chapitre relatif à l'appauvrissement.

On voit donc que l'apparition de la gibbsite sera facilitée d'une part par les pluviométries élevées, d'autre part par la faible abondance du quartz. On retrouve les conclusions de la première partie de notre étude établies d'après l'étude monographique des sols et de leur environnement : au-dessus de 2.500 mm, la gibbsite apparaît dans les sols ferrallitiques très bien drainés, sauf quand le squelette quartzeux est bien représenté dans le profil. C'est le cas des sols sur grès, qu'ils soient "rouges" ou non.

4.1.3 - Conclusions

La désilicification avait été suggérée par les états de surface des quartz en voie de désagrégation mécanique. De plus, elle permettait de comprendre le mécanisme de la diminution progressive de la taille des sables, en particulier dans les classes les plus fines. Par la suite, elle a été confirmée comme mécanisme pédogénétique grâce aux calculs d'enrichissement relatif en argile et en fer comparés à ceux de titane dans les horizons C. L'étude thermodynamique apporte enfin les arguments théoriques qui nous permettent de relier les résultats précédents. Elle confirme la possibilité de la désilicification des quartz comme un des mécanismes de la différenciation des horizons B. Elle met en évidence le rôle essentiel du quartz dans la pédogénèse des sols ferrallitiques. Le quartz, en effet, représente une importante source de silice, plus ou moins active en fonction des conditions climatiques. Selon ces dernières, et selon la richesse en quartz des matériaux ou des sols, la pédogénèse se traduira, ou non, par de la gibbsitisation. Cependant, nous n'avons pas pu vérifier la réalité de solutions de sol contenant entre 1 et 6 ppm de silice. Cette vérification est fort délicate, car il s'agirait de déterminer les teneurs en silice dans les solutions, au niveau des grains de quartz dans les horizons en voie d'évolution et non dans les nappes phréatiques inférieures qui circulent dans les roches-mères. Cette vérification semble avoir été approchée par ROOSE dans les sols jaunes développés sur les sables tertiaires de la Côte d'Ivoire (ROOSE et BIROT 1970). Les solutions du sol qui percolent dans les horizons B des profils contiennent 5 à 15 ppm de SiO_2 , avec des variations sensibles en fonction de la pluviométrie. Ces mesures valident l'hypothèse proposée. Les basses teneurs en silice des solutions peuvent être atteintes et le quartz est le seul minéral possible comme source de silice.

Ces conclusions débordent le cadre des sols rouges sur grès. Elles s'appliquent aux sols sur matériaux originels équivalents, en particulier aux altérations ferrallitiques sur roches variées. Cependant, elles ne précisent pas les raisons de la libération de la silice en présence du fer. Cette question sera reprise au chapitre suivant. Mais la mise en mouvement de la silice, dont la libération vient d'être mise en évidence, suppose cependant certaines conditions du milieu.

4.2 - La mobilité de la silice

La mobilité de la silice suppose l'existence d'une circulation d'eau dans un milieu drainant. Nous envisagerons successivement l'état de l'eau dans les sols, puis dans les nappes.

a) les profils hydriques :

Les différents profils hydriques qui ont été relevés, soit dans les deux toposéquences, soit dans des profils divers, géographiquement voisins, montrent qu'en fin de saison sèche la base des horizons B et les niveaux de roches-mères, contiennent encore une certaine proportion d'eau. En Haute-Volta, au mois de mai la partie supérieure des profils était à un taux d'humidité voisin ou inférieur au point de flétrissement. Mais à 6 mètres la sensation humide au toucher devenait nette. A 7 mètres, le sol contenait 8,6 % d'eau. Ensuite tout le reste du puit jusqu'à la nappe, à plus de 20 mètres, restait légèrement humide. C'est dire que les horizons profonds et les roches-mères sableuses ne se dessèchent jamais, l'évapotranspiration étant faible à grande profondeur.

En Casamance, CHAUVEL (1965, inédit) confirme la bonne pénétration de l'eau dans les sols rouges lors d'une étude faite sur 7 mètres de profondeur. Des mesures de perméabilité effectuées par TOBIAS (1968) sur prélèvements non remaniés, ont montré que la perméabilité des sols rouges se maintenait constante et élevée dans le temps. Tandis qu'en fin de saison sèche l'humidité de toute la partie supérieure du profil se trouvait aux environs du point de flétrissement, fin juillet, les profils sont humidifiés de façon homogène. En janvier, lors du creusement des fosses de la toposéquence de Casamance, les horizons B et C étaient humides. Les mesures étaient remarquablement groupées autour de valeurs moyennes de 15 % d'eau pour les horizons B, et de 11 % pour les horizons C. La rétention d'eau par le sol à cette époque représentait une hauteur d'eau de 2,25 m, hauteur supérieure à la pluviométrie annuelle.

A partir d'un certain niveau de pluviométrie, il est donc prouvé que les horizons profonds ne se dessèchent jamais complètement, même par évapotranspiration sous forêt. A chaque saison des pluies le profil se recharge d'eau jusqu'à la capacité de rétention. Celle-ci atteinte, il

y a percolation, dont le taux est plus élevé dans les horizons supérieurs et diminue progressivement en profondeur.

b) les nappes

Le drainage libre conduit à l'alimentation progressive des nappes. Ces dernières sont à profondeur variable, mais en Casamance elles sont peu profondes. Dans la région de la tposéquence, nous y avons effectué des dosages de silice. La nappe contient en moyenne 13 mg/litre de silice, dans un niveau qui se trouve entre 6 et 8 mètres en dessous de la limite inférieure des horizons B. Cette teneur en silice nous permet d'avancer deux conclusions :

- il y a effectivement solubilisation de silice dans les sols et dans les roches-mères.
- il est probable que les solutions percolant à travers les horizons C des sols contiennent souvent moins de 6 ppm de silice, puisque les nappes qui les reçoivent n'en contiennent que le double. C'est évidemment une simple déduction, mais ROOSE a observé que les nappes étaient toujours plus concentrées en silice que les solutions du sol, dans des profils de côte d'Ivoire sur grès (ROOSE, communication personnelle).

L'existence de silice dans l'ensemble des nappes du Continental terminal de Casamance a été prouvée par des analyses du B.R.G.M. (chiffres non publiés). La nappe contient des quantités de silice de 6 à 25 mg/litre ; la moyenne pour 47 mesures était de 14 ppm de silice. Ces valeurs largement inférieures à la solubilité de la silice dans l'eau (120 à 140 ppm) sont loin d'être négligeables. Elles sont presque du même ordre que celles trouvées dans les nappes circulant sous les sols ferrallitiques où des dépôts importants de silice ont été prouvés. En effet, les divers chiffres relevés dans la littérature s'étagent entre 8 et 30 ppm, et TARDY (1967), fournit des valeurs de 8 à 14 ppm pour la Côte d'Ivoire.

c) Conclusions

La mobilité de la silice est possible compte tenu des observations sur les profils hydriques. Nous retrouvons à nouveau la conclusion (voir première partie) sur l'actualité de l'approfondissement de nombreux sols rouges, à partir de pluviométries supérieures à 1.200 mm. De plus, la mobilité de la silice est vérifiée indirectement par la présence de cet élément dans les nappes qui circulent juste sous les sols rouges.

4.3 - Le devenir de la silice : les silicifications

4.3.1 - Données bibliographiques

Dans les régions gréseuses, de nombreux cas de silicifications ont été signalés dans la bibliographie. Ces silicifications sont surtout apparentes dans les régions arides. Plusieurs explications peuvent être retenues. Il se peut que ces régions soient caractérisées par une grande mobilité de la silice dans les paysages ; il est possible que la migration de la silice s'y réalise à moins grande distance que dans les régions équatoriales, où elle se terminerait en mer. Il est probable, enfin, que les phénomènes d'érosion quaternaires ont déblayé des épaisseurs élevées de terrains meubles, mettant à nu des niveaux silicifiés.

MILLOT (1964), a fourni une bibliographie sur cette question. Il indique que les pays arides présentent souvent de grandes surfaces structurales qui ont été silicifiées. Les grès donnent des dalles de quartzite, les calcaires donnent des faciès de meulière ou des plateformes sculptées en forme de crânes ou d'éponges, les argiles donnent des opales et cornalines parfois vivement colorées (MILLOT et FAUCK, 1970). De belles descriptions ont été faites au Kalahari, en Australie et surtout au Sahara.

Beaucoup d'auteurs ont abordé le problème de l'origine de ces silicifications. RADIER (1957) a envisagé une interprétation d'ordre pédologique pour les terrechts silicifiés du Mali. Il note une liaison entre les silicifications, c'est-à-dire l'apport de silice, et un départ d'éléments calco-alcalins, et éventuellement ferro-magnésiens. ALIMEN (1958)

se préoccupe également de donner une origine pédologique aux silicifications sahariennes. MULLER-FEUGA (1964) pour le Fezzan, et SOUGY (1959) pour la Mauritanie, abordent les mêmes problèmes. ELOUARD (1959) décrit les cherts, silicifications totales, dans l'éocène moyen du guebla mauritanien. ELOUARD et MILLOT (1959) notent le rapport entre la nature des silicifications et celle de la roche-mère dans le cas des grès ferrugineux du Gorgol.

MILLOT, RADIER, MULLER-FEUGA, DEFOSSEZ et WEY (1959) faisant une première synthèse des données acquises sur les silicifications sahariennes, admettent la possibilité d'une origine pédologique pour certaines d'entre elles. Leur rôle prépondérant dans la morphologie du désert est remarquée. DEFOSSEZ (1963) précise que dans la boucle du Niger, la nappe profonde du Gondo contient en moyenne 8 ppm de silice. Des silicifications très variées et nombreuses coïncident avec le niveau statique de cette nappe. Tous les faciès, que ce soient des dolomies, des sables ou des argiles, qu'ils appartiennent à la série dolomitique ou à la couverture sablo-argileuse du Continental terminal, sont affectés par le phénomène. WANNESON (1963 et 1968) indique que la silicification des grès se fait per descensum par des phénomènes de pédogénèse.

MILLOT (1960 et 1964) conclut à l'origine climatique des silicifications sahariennes, car elles ne se prolongent jamais sous les buttes témoins ou les falaises qui les dominent. Le mécanisme proposé est la croissance des cristaux par épigénie à partir de solutions diluées, et non à partir de gels. CONRAD (1968) insiste longuement sur l'importance dans le Sahara algérien des silicifications affectant le Continental intercalaire et le Néogène continental. Il sépare les silicifications diagéniques de celles dites tardives, qui se seraient poursuivies jusqu'au Villafranchien supérieur. Il envisage deux explications : l'une concerne le rôle des nappes qui contiennent actuellement 20 ppm de silice/litre et peuvent donc permettre le nourrissement des cristaux ; l'autre est d'origine pédologique, et a déjà été envisagée par AUZEL et CAILLEUX (1949) puis ALIMEN et DEICHA (1958). En définitive, CONRAD pense que la seconde explication, bien qu'elle soit beaucoup plus complexe dans ses modalités, est la plus probable.

Plus récemment LEPRUN (1968) pour la région du Sourou (Haute-Volta), puis BOULET et NAHON (1970) pour la Mauritanie, observent des cas de silicifications dans les régions à Continental terminal, en particulier autour des buttes résiduelles.

Mais les diatomites représentent également une forme de blocage de la silice très répandue au sud du Sahara, depuis la Mauritanie jusqu'au Soudan, en passant par le Mali, le Niger et le Tchad. Au quaternaire récent, dans les grands lacs qui occupaient ces régions, une prolifération extraordinaire de diatomées s'est traduite par des dépôts de diatomites. Silicifications et diatomites sont donc des phénomènes très courants au Sud du Sahara.

4.3.2 - Interprétations et conclusions

Les régions gréseuses, en particulier celles à Continental terminal, ou à Continental intercalaire, ont donc été le siège de déplacements importants de silice. Les silicifications sont d'origine climatique, et le rôle de la pédogénèse est admis par la plupart des auteurs. Pour provoquer l'épigénèse de toutes les roches, il est évident que les solutions doivent être riches en silice. Mais il est important qu'elles soient pauvres en tout autre cation. Dans le cas contraire, en effet, ce sont des argiles qui se néoforment. De plus, pour silicifier une roche, il faut en dissoudre les constituants, ce qui suppose des solutions très désaturées en tout élément autre que la silice. De même, le dépôt des diatomites pures suppose des eaux siliceuses, mais pauvres en cations.

En Casamance les eaux des nappes du Continental terminal, sous les sols rouges, ont la composition suivante :

- de 11 à 20 mg/litre de silice
- un résidu sec, variable de 28 à 240 mg, mais le plus souvent inférieur à 150 mg/litre
- un total cations (Ca, Mg, K, Na) de l'ordre de 1 milli-équivalent
- un total anions (Cl^- , SO_4^{--} , CO_3H^- , CO_3^{--} , NO^-) de l'ordre de 1 méq
- des teneurs en fer généralement de 0,1 mg/litre.

Les prélèvements sous les sols rouges de la toposéquence contiennent de 12,7 à 13,4 mg/litre de SiO_2 et moins de 50 μ g/litre de fer. En se référant à TARDY (1967), on constate que ces eaux sont moyennement riches en silice et très diluées en cations et en anions. Les faibles teneurs en fer sont à remarquer.

Une enquête d'Hélène PAQUET sur les qualités des eaux pour le développement des diatomées indique que les teneurs en silice sont largement suffisantes. Ces eaux manquent, par contre, de matière nutritives nitrates et phosphates. Mais ces dernières peuvent être apportées dans les lacs par d'autres voies.

Dans la vallée du Sourou, LEPRUN (1969) a observé des silicifications et des diatomites. Compte tenu de l'étude géomorphologique, ces diatomites dateraient de la période humide de l'holocène. Le Sourou était devenu un milieu qui concentrait les solutions venues de l'amont. Or, il est remarquable que le réseau hydrographique prend essentiellement ses sources dans la région des sols rouges de Bobo-Dioulasso à Orodara. Ce réseau se diversifie ensuite, et il traverse des grès siliceux où PALAUSI (1959) décrit des ciments siliceux, phylliteux et ferrugineux, à la base de lits conglomératiques de jaspes et de calcédoine. Une étude de la dynamique de l'eau dans les paysages, comme celles tentées par LELONG (1968) et TARDY (1969) et surtout celle en cours par ROOSE, pourrait seule apporter des vérifications au mécanisme de la mobilité de la silice. Mais cette mobilité bien que vérifiée de façon indirecte, est suffisamment bien prouvée.

Si les silicifications climatiques sont d'origine pédologique, et les preuves s'accumulent, un nouvel argument nous est donné en faveur du départ de la silice hors des profils, et du même coup en faveur de l'enrichissement relatif en argile et en fer. Ce mécanisme joue complémentaiement à celui de l'importation d'argile et de fer dans le milieu, en provenance des horizons supérieurs et des profils en amont. La part respective des deux mécanismes est difficile à préciser. Elle doit dépendre :

- d'une part de la position dans la toposéquence. L'importation d'argile, "accumulation du type absolu" (D'HOORE, 1952) est sûrement plus importante dans les profils situés dans la partie basse de la toposéquence.

- d'autre part de la place dans le profil. Les horizons B sont, d'après nos évaluations, surtout le siège d'une accumulation absolue, l'argile et le fer étant piégés sur les pseudo-particules. Les horizons C par contre seraient surtout celui d'une "accumulation relative" (D'HOORE, 1952) par dépôts élevés de silice. Ce sont dans ces horizons que la variation de granulométrie des quartz est la plus élevée.
- enfin des caractéristiques des matériaux. Dans le cas des niveaux sableux de Haute-Volta le départ de silice serait très important ; le chiffre de 60 % a même été envisagé pour un des niveaux de roche-mère transformé en sol.

Nous avons effectué quelques calculs pour voir si l'hypothèse de l'enrichissement relatif était plausible. Dans un profil de Casamance, en supposant un drainage annuel en profondeur de 500 mm, sous un climat à pluviométrie moyenne de 1.500 mm, et avec une teneur en solution en silice de l'eau percolée de 14 ppm, l'élaboration d'un horizon B de 6 mètres d'épaisseur par un départ relatif de silice pourrait être effectuée en 24.000 ans. En Haute-volta, où le taux d'argilification est très élevé par rapport au matériau, la durée théorique calculée sur le niveau le plus sableux atteindrait 1 million d'années. Ces deux durées sont nettement inférieures à celles qui se sont déroulées depuis la mise en place des roches-mères respectives. L'hypothèse n'est donc pas absurde. Cependant, la masse de silice entraînée serait énorme. Dans le cas de certains niveaux sableux de la Haute-Volta, il y aurait perte de presque 60 % du quartz initial. On hésite un peu à admettre ce chiffre, pourtant comparable, et même inférieur, à celui de la silice éliminée lors de l'altération des roches granitiques en milieu ferrallitique. Cela voudrait dire qu'un profil de 5 mètres d'épaisseur résulterait, par tassements progressifs, de l'évolution pédogénétique d'environ 20 mètres de roches-mères gréseuses. Des tassements sont probables, et en première partie nous avons même envisagé d'expliquer les nombreuses dépressions fermées des régions gréseuses par un soutirage important, qui ne pouvait être que de silice. LELONG (1968) a admis également la possibilité de tassements considérables dans les sols ferrallitiques. Remarquons que cette amputation est

inférieure à celle envisagée dans l'hypothèse précédente d'une concentration progressive, au cours du temps, des éléments transitant vers la profondeur (érosion de 90 mètres).

En définitive, nous pensons que les deux mécanismes :

- a) concentration progressive par transits de l'argile et du fer vers les horizons B profonds,
- b) enrichissement par départs de silice, surtout dans les horizons C, se complètent. La résultante de leurs actions est la morphologie caractéristique vers laquelle convergent tous les sols "rouges". Au cours du temps, par simple pédogénèse, le niveau de la surface des sols descend progressivement. La pédogénèse est donc une cause de morphogénèse. Mais aux tassements d'origine pédogénétique s'ajoutent les phénomènes d'érosion des horizons supérieurs, rendus fragiles par leur appauvrissement.

C - CONCLUSIONS DU CHAPITRE SUR LA DIFFERENCIATION TEXTURALE DES HORIZONS B.

La différenciation texturale est l'un des deux phénomènes principaux qui traduisent la transformation des roches-mères en horizon B de sols rouges. L'autre phénomène est la rubéfaction.

La différenciation texturale se traduit :

- a) par une augmentation des sables des fractions granulométriques moyennes (cf. chapitre I de la 2ème partie).
- b) par une réorganisation de la texture par individualisation de pseudo-particules. Ces dernières sont des agrégats de stabilité variable enrichis en kaolinite et en fer autour des quartz cariés et fragmentés.
- c) par une argilification, c'est-à-dire une augmentation de la fraction granulométrique de 0 à 2 microns. Elle est due en partie à l'introduction dans la fraction argileuse de quartz et d'hydroxydes de fer, en partie à

l'augmentation par unité de poids des teneurs en kaolinite. Les mécanismes possibles de la kaolinisation et de l'argilification ont été discutés. Deux sont à retenir, dans le cas des sols rouges :

- l'importation de kaolinite ou d'alumine dans le milieu. C'est un enrichissement absolu qui est en rapport avec la présence d'horizons appauvris dans les horizons supérieurs du profil et dans les profils situés en amont.
- l'exportation de silice à partir du milieu. Cette exportation a été envisagée comme conséquence de l'évolution granulométrique et morphologique des sables. Elle a été suggérée par l'étude de la composition des horizons C. Sa réalité a ensuite été indirectement vérifiée par la teneur en silice des nappes sous les sols rouges, et par l'importance des silicifications dans les régions gréseuses. Enfin, il a été vérifié que toutes les conditions thermodynamiques étaient rassemblées pour que ce mécanisme se déclanche.

L'argilification absolue semble dominante dans les horizons B. L'argilification relative semble très importante dans les horizons C. La première se réalise avec l'importation concomitante d'hydroxydes de fer. La seconde semble se déclancher par l'arrivée de ces mêmes hydroxydes de fer. Dans les deux cas, c'est la rubéfaction qui traduit morphologiquement la dynamique du fer. C'est donc cette dernière question qu'il est maintenant nécessaire d'analyser.

CHAPITRE VI - LA RUBÉFACTION

A - GENERALITES

La couleur rouge des horizons B est le caractère le plus apparent de tous les profils de sols retenus dans cette étude. Le terme rubéfaction a été utilisé pour exprimer ce fait. Cette couleur, masquée seulement en surface par la présence de produits organiques, a été le caractère distinctif permettant de séparer les sols des autres types. Ce caractère à été choisi de façon arbitraire, car rien n'indiquait initialement que la couleur représentait quelque chose d'essentiel sur le plan de la pédogénèse. Mais l'étude comparative des sols a montré que ce phénomène est lié systématiquement à celui d'argilification, et qu'il est en liaison étroite avec la dynamique du fer. Dans ces conditions la rubéfaction représente probablement un fait pédogénétique important.

Pour essayer de comprendre le, ou les mécanismes responsables de la transformation de roches très diverses en horizons B rubéfiés homogènes, nous examinerons successivement :

- les données bibliographiques sur la rubéfaction
- les formes du fer et leurs répartitions dans les sols rouges sur grès
- les relations entre le fer et les autres constituants des sols
- enfin l'importance pédogénétique de la rubéfaction.

Dans ce texte, nous utiliserons les mots ferruginisation et ferrisation avec les sens donnés par PEDRO (1964) :

- ferruginisation : processus d'altération aboutissant à l'individualisation du fer. Ce processus crée le fer dit "libre".
- ferrisation : fer déplacé qui s'immobilise à l'état d'hydrates ferriques en arrivant dans le milieu d'accumulation.

Le mot déferfification, déjà utilisé plusieurs fois, signifie qu'il y a diminution, par un processus quelconque, de la quantité de fer du milieu.

**B - LES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA RUBEFAC-
TION DANS LES REGIONS TROPICALES**

Parmi les nombreux auteurs qui ont étudié le problème du fer dans les sols, assez peu nombreux sont ceux qui ont envisagé les relations couleur-fer dans les régions tropicales. Pourtant, le problème de la rubéfaction n'est pas spécifique aux sols "rouges" sur grès. Il se rapporte à des types variés, répartis des régions équatoriales aux régions méditerranéennes. Il concerne des sols contenant des argiles 1/1 et des argiles 2/1.

D'une façon générale, les chercheurs supposent comme condition préalable la présence d'une certaine quantité de fer : citons en particulier pour les régions tropicales : WAEGEMANS et HENRY (1954), FRIPIAT et GASTUCHE (1952). Mais plusieurs auteurs ont rattaché la couleur rouge, des sédiments, ou des sols, à l'existence de conditions climatiques particulières. Ainsi le faciès des grès rouges est expliqué par MILLOT (1964 et 1967) comme le produit du remaniement d'altérations aréniformes rubéfiées, nées sous des climats chauds, à saisons humides et sèches alternantes. WALKER (1967) indique que les sédiments de piedmont du Nouveau Mexique ont acquis leur couleur après la fin de leur dépôt sous un climat aride. Dans le cas des sols, il en est de même pour KUBIENA (1956) qui relie la rubéfaction à des climats alternants à saisons sèches pluvieuses, dans les sols perméables, à grande conductivité thermique, et riches en fer. Cependant, l'existence de sols très rouges dans des régions équatoriales montre que le type de climat est une variable peut être nécessaire pour la rubéfaction, mais pas suffisante pour expliquer entièrement le phénomène. C'est ce qui a amené plusieurs auteurs à considérer comme essentielles certaines caractéristiques de sols. Le drainage est la première envisagée. RIQUIER (1963) constate, en effet, que la chaîne des sols rouges est continue de l'équateur

aux régions subarides quand un bon drainage est assuré. HERVIEU (1966) arrive à la même conclusion en insistant sur l'importance de l'emplacement sur le modelé dans le cas des sols de Madagascar, en particulier ceux sur grès. L'une des conclusions de la première partie de ce mémoire, lors de la comparaison systématique des sols, était également la liaison entre les sols rubéfiés et les conditions de bon drainage. D'autres caractéristiques ont été envisagées. Pour BOULAINÉ (1966), c'est la pauvreté en bases qui est déterminante, tandis que pour MONNIER (1967) les répartitions granulométriques ont un rôle important.

S'attachant aux sols à hydroxydes, très répandus dans les régions tropicales, SEGALÉN (1968 b) établit l'inventaire des connaissances sur la couleur. Il insiste sur le fait qu'aux notions de climat et de modelé il faut associer celle de présence du fer, non seulement, en quantité, mais aussi en qualité. Les variations de couleur dépendent des types d'oxydes et d'hydroxydes, de l'état de la valence (les formes oxydées étant les plus rouges), enfin du degré d'hydratation. DUCHAUFOUR (1960 et 1965) insiste aussi sur ce dernier point. Sans reprendre l'inventaire bibliographique de SEGALÉN, signalons que plusieurs auteurs avaient déjà souligné l'importance de la forme du fer pour la coloration : KUBIENA (1956) avait envisagé une évolution d'hydroxydes de fer amorphe vers des produits cristallisés, type hématite fortement colorée ; TAYLOR et GRALEY (1967) concluaient à l'importance des proportions entre hématite rouge et goéthite jaune, tandis que pour SCHWERTMANN et LENTZE (1966) c'était celles entre hématite, lepidocrocite et goéthite qu'il fallait retenir. Par contre, WAEGEMANS et HENRY (1954) étaient arrivés à la conclusion qu'il n'y avait pas de relation entre coloration et indice d'hydratation, ou teneur en oxydes de fer libre, ou type de granulométrie. Pour eux, la coloration est une propriété de surface, qui ne peut être exprimée par une détermination analytique globale, et qui dépend des conditions présentes ou passées du milieu. SOILEAU et MC CRACKEN (1967) ont suggéré que la couleur est en relation avec la taille des particules d'oxydes de fer qui sont presque entièrement incluses dans la fraction argileuse. Cependant, ils admettent l'importance du degré d'hydratation, et celle de formes amorphes extraites par le dithionite de sodium. Ces formes sont particulièrement bien représentées dans les sols les plus rouges. Notons

enfin que PEDRO (1968) ajoute à la notion de formes du fer celle d'une température supérieure à 20° et d'une pluviométrie supérieure à 500 mm.

Cet aperçu bibliographique succinct suffit cependant pour indiquer que les travaux les plus récents donnent à l'existence de plusieurs formes de fer le rôle essentiel dans l'acquisition de la rubéfaction. Certaines conditions climatiques, ou pédoclimatiques, semblent nécessaires, mais non suffisantes pour expliquer l'ensemble du phénomène.

Nous allons essayer d'approfondir cette question dans le cas des sols rouges sur grès.

C - LES FORMES DU FER DANS LES SOLS ROUGES SUR GRÈS

1) Les différents états du fer dans les sols.

SEGALEN (1964) a présenté une liste des états du fer dans les sols. Il distingue les termes suivants : oxydes, hydroxydes, silicates, formes cristallisées et amorphes, fer ferreux, ferrique, échangeable, libre, chélaté et complexé. Ces différents états du fer sont définis par des méthodes analytiques très variées. Les résultats qu'elles fournissent sont à interpréter avec prudence, car il y a parfois recouvrement de certaines notions. En particulier, celle de fer libre a été discutée. SEGALEN (1968 a) définit le fer libre comme l'ensemble des formes non primaires, ou liées à un minéral argileux. Le fer libre ainsi défini est susceptible de participer à la pédogénèse, en particulier en ce qui concerne la mobilité dans les profils, et les phénomènes de rubéfaction. Sa caractérisation est donc essentielle. Plusieurs auteurs se sont efforcés de déterminer ce fer libre ou de lui donner une signification. Dans les régions tropicales citons surtout D'HOORE (1949), DEB (1950) MAIGNIEN (1962), DUCHAUFOR et SOUCHIER (1966), SEGALEN (1969), N'GUYEN KHA et DUCHAUFOR (1969), enfin SEGALEN (1971) qui fait le point de cette question. Une autre forme de fer a été très étudiée depuis quelques années, c'est le fer amorphe. MITCHELL, FARMER et MC HARDY (1964) passent en revue les principaux résultats obtenus par les chercheurs. Parmi les premiers

qui ont étudié les sols ferrallitiques proprement dits, citons ALEXANDER et CADY (1962), FIELDS et SWINDALE en Nouvelle-Zélande (1954 à 1957). Depuis, la liste s'est allongée comme on pourra le voir plus loin.

2) Les méthodes d'étude retenues

Au fur et à mesure du développement des recherches sur les sols rouges sur grès, nous avons utilisé un certain nombre de techniques analytiques. Le choix définitif des méthodes, et les formes de fer qu'elles mettent en évidence, est le suivant :

a) Fer total

Il s'agit de l'ensemble du fer, quelle que soit sa forme. C'est l'analyse triacide qui a été utilisée. Une comparaison avec la méthode par fusion alcaline, a montré que les deux déterminations étaient comparables (cf. tableau B 13 - chapitre II), lorsqu'il n'y avait pas de minéraux altérables abondants, (CHAUVEL et FAUCK, 1971). En pratique il y a des résultats par défaut dans deux cas particuliers : dans le premier, tout le fer qui se trouve dans les canalicules des quartz n'est pas enlevé par l'analyse triacide, malgré une certaine désagrégation des quartz ayant subi la ferrisation ; dans le second cas, il existe des minéraux altérables résiduels protégés par des gangues diverses. L'analyse triacide respecte une partie de ces minéraux altérables, sauf cependant la biotite et la magnétite (SEGALEN, 1970 b). Les erreurs possibles ne sont pas très grandes dans le cas des horizons B des sols, mais elles pourraient l'être dans celui de certains horizons C.

b) Le fer libre

Le fer libre a surtout été dosé par la méthode de D'HOORE (1949). Une étude de ARIAL (1963), effectuée sur des profils de sols kaolinitiques du Sénégal, a montré qu'elle était équivalente à celle de la méthode DEB (1950). Toutefois, cette dernière a été utilisée pour un certain nombre d'échantillons (DUGAIN, 1961). Mais toute méthode de dosage détermine essentiellement une forme facilement extractible par des réactifs chimiques, ce qui représente une approximation du fer réellement libre. SEGALEN (1968 a) a mis en évidence l'importance du nombre d'extractions dans la méthode DEB. Il note

aussi qu'elle donne des chiffres supérieurs au total du fer des oxydes amorphes et cristallisés. Il est donc nécessaire d'interpréter les chiffres avec prudence. Toutes les méthodes d'extractions ont, en effet, le défaut de dissoudre plusieurs constituants, et les cinétiques de dissolution sont parfois assez voisines. SEGALEN et LEAL SILVA (1969) ont d'autre part essayé de préciser le fer facilement extractible par des réactifs doux. Leur étude comportait un échantillon de sol rouge sur grès. Elle a abouti à la conclusion que le fer à l'état trivalent est peu susceptible de déplacements sous l'action d'acétate d'ammonium à pH variable. Dans les conditions naturelles, où les solutions sont très diluées, les mouvements de fer libre ne peuvent donc se faire qu'en présence de solutions complexantes, ou avec un abaissement du potentiel redox.

Les résultats de fer libre que nous utiliserons sont donc probablement sous-estimés. La notion de fer libre doit être maniée avec prudence, et elle ne représente pas forcément le fer susceptible d'être mobilisé. Ce fer libre comprend des formes cristallisées et des formes amorphes, auxquelles il faut ajouter le fer complexé ou chélaté. Nous examinerons successivement ces différents états.

c) Le fer libre cristallisé

Les hydroxydes de fer cristallisés ont été recherchés par les méthodes physiques (Rayons X et analyse thermique différentielle ATD). C'est la goethite et l'hématite qui ont été le plus couramment identifiés. La magnétite n'a pas été spécialement recherchée. Mais un essai d'utilisation du séparateur Frantz a permis d'individualiser une fraction importante de sables magnétiques. Dans un certain nombre de cas, aucun hydroxyde cristallisé n'a été décelé dans les échantillons. Nous n'en avons pas déduit que ces hydroxydes n'existaient pas. En effet, les méthodes ont une limite de sensibilité (SIEFFERMANN, 1969) et il est probable qu'en dessous de 1 % rien n'apparaît sur les diagrammes RX. De plus, ces derniers peuvent être faussés par la présence de produits à l'état amorphe. Aussi, une autre méthode d'évaluation a été tentée : la différence entre les quantités de fer libre et de fer amorphe déduites des résultats d'analyses chimiques. Cette fois encore il s'agit d'une approximation. Le fer libre est probablement caractérisé par défaut dans

de nombreux cas. Le fer amorphe est déduit d'une méthode graphique avec tout ce que cela comporte d'imprécision. C'est pourtant ce chiffre qui a été présenté comme fer cristallisé libre dans les tableaux.

d) Le fer amorphe

C'est la méthode SEGALEN (1968 b) qui a été utilisée, avec un minimum de sept extractions successives. Les analyses ont été effectuées dans les Services Scientifiques de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy (cf. figure B 22). Le fer amorphe a été dosé en même temps que l'alumine et la silice amorphe. Un certain nombre de résultats ont été difficilement interprétables, car le tracé des tangentes se révélait arbitraire. Il est apparu par la suite que le nombre d'extractions était insuffisant.

e) Le fer complexé ou chélaté

Les quantités de fer chélaté ou complexé, en particulier avec des anions organiques, n'ont été évaluées que par des méthodes indirectes de pédologie expérimentale. Cette question sera envisagée au chapitre traitant des horizons supérieurs appauvris.

f) Le fer "combiné"

Il s'agit d'une donnée calculée d'après la différence entre le fer triacide total et le fer libre. Théoriquement, elle représente le fer non libre, c'est-à-dire celui qui est inclus dans des minéraux primaires ou dans des minéraux secondaires. En principe, c'est l'analyse par fusion alcaline qui aurait dû être utilisée pour aboutir à une évaluation du fer lié à des minéraux. En effet, la méthode triacide risque de fournir des chiffres par défaut dans le cas des horizons C. D'autre part, les résultats de fer libre nous semblent souvent être inférieurs à la réalité. Dans ces conditions, ce que nous appelons "fer combiné" n'est qu'une simple approximation du fer non libre.

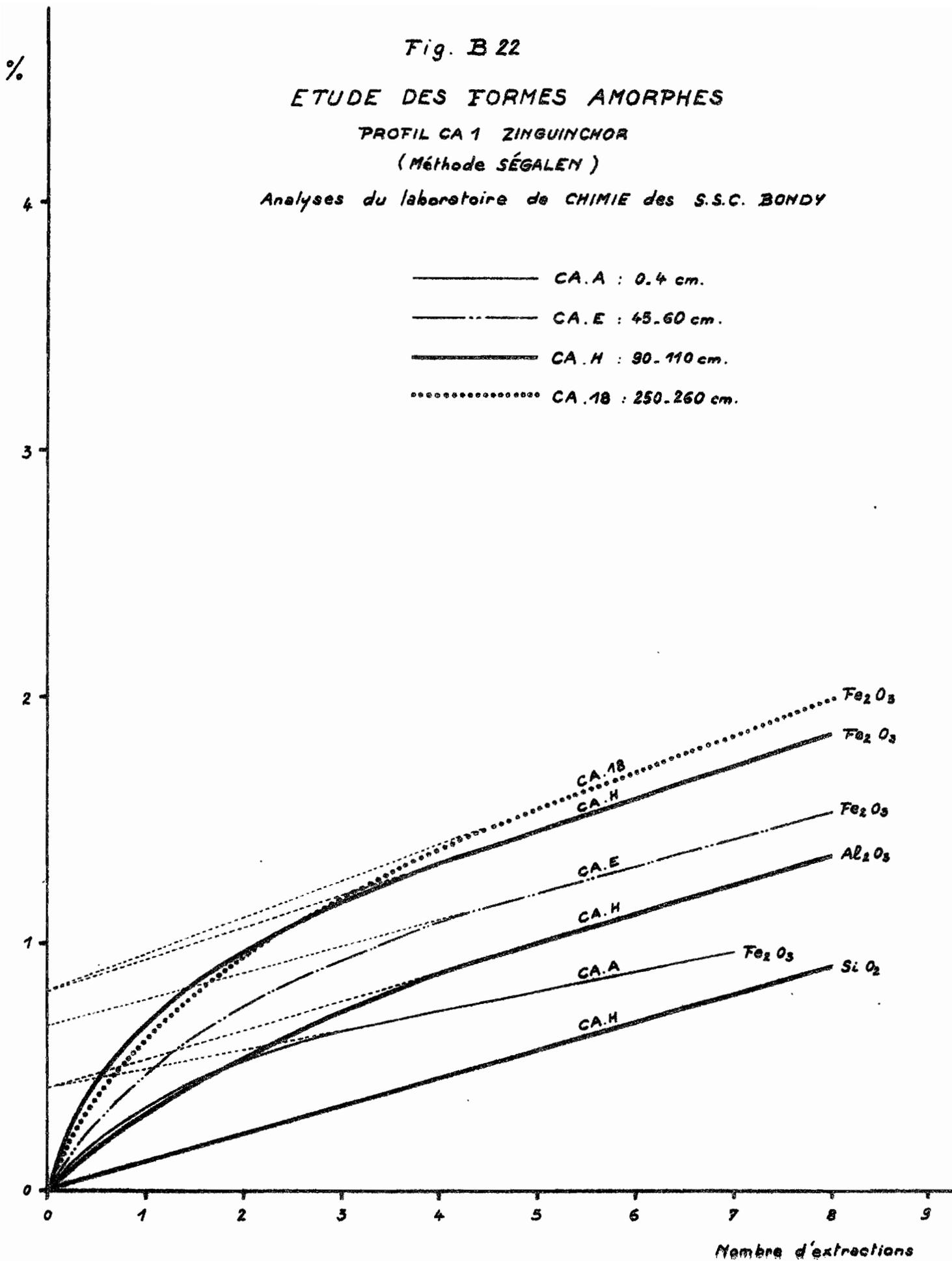
Fig. B 22

ETUDE DES FORMES AMORPHES

PROFIL CA 1 ZINGUINCHOR

(Méthode SÉGALEN)

Analyses du laboratoire de CHIMIE des S.S.C. BONDY



3) Les résultats

3.1 - Le fer total

Les teneurs en fer total sont assez variables, mais, en moyenne, relativement peu élevées (cf. 1ère partie). Les deux toposéquences présentent cependant des différences importantes en ce qui concerne la comparaison des horizons C et B.

En Haute-Volta, certains niveaux sédimentaires, parfois de couleur blanche, ne contiennent que très peu de fer (0,1 %). Les horizons B des sols qui leur correspondent dans les profils latéraux en contiennent plus de 5 %.

En Casamance, les horizons C (les roches-mères non altérées ne sont pas connues) contiennent de 3,2 % à 6,2 % de fer selon les endroits. Un niveau grèsifié en contient même 9,6 % dans ses parties indurées. Cependant, les horizons B sont très comparables entre eux, quels que soient les profils et leurs teneurs en fer total sont comprises entre 4 et 5 %.

Deux conclusions peuvent être avancées :

- la pédogénèse peut provoquer une forte accumulation de fer, lorsque les roches-mères sont très pauvres en cet élément.
- la pédogénèse tend à uniformiser les teneurs, en éliminant une partie des excès de fer par rapport aux surfaces argileuses.

3.2 - Le fer libre

Les teneurs en fer libre sont assez variables, mais le résultat essentiel est la constance du rapport fer libre/fer total dans les horizons B. Dans l'ensemble des profils de Casamance, le rapport s'étale entre 0,60 et 0,95, mais le plus souvent il est de 0,70 à 0,80. Cependant, les études de SEGALEN sur la méthode DEB (1968a) nous amènent à penser que ces chiffres sont inférieurs à la réalité. Sur un prélèvement de sol rouge, SEGALEN, avec trois extractions, obtient 20 % de fer de plus qu'avec une seule extraction. Ce résultat indique que le fer libre représenterait plutôt 90 % du fer total triacide.

TABLEAU N° B 16 - Les états du fer dans le profil CA 1 de BASSE-CASAMANCE -

Valeurs absolues

	Profondeur	Fer triacide	Fer total nitrique	Fer libre d'HOORE	Fer amorphe	Fer combiné	Argile granulométrique	Alumin.	Titane	Fer cristallisé	Al x2,53= Argile calculée
GA A	0-4	0,90	0,90	0,73	0,41	0,17	6,5	3,	0,43	0,32	9,5
B	4-16	0,85	0,93	0,70	0,36	0,15	7,0	3,8	0,41	0,34	9,6
C	16-28	1,00	0,98	0,77	0,24	0,23	8,5	3,9	0,41	0,53	9,9
D	28-45	1,60	1,46	1,21	0,30	0,39	17,0	6,5	0,48	0,91	32,6
F	60-75	2,95	2,54	1,89	0,75	1,06	34,0	12,7	0,68	1,14	32,1
H	90-110	2,50	2,28	1,73	0,80	0,77	32,0	12,3	0,70	0,93	31,0
I	150-160	2,55	2,11	1,60	0,82	0,95	25,5	10,4	0,70	0,78	26,4
18	250-260	2,60			0,80		27,5	11,9			30,8

Valeurs relatives

	Profondeur	Fer libre	Fer triacide/arg. granulomé.	Fer amorphe/arg. granulomé.	Fer triacide/Al	Fer amorphe/Al	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fer amorphe/fer triacide	Fer libre/argile calculée	Fer triacide/titane	Al/Ti
GA A	0-4	0,81	13,8	6,3	0,24	0,11	1,8	0,42	7,7	2,1	8,
B	4-16	0,82	12,2	5,1	0,22	0,09	0,39	0,09	7,3	2,1	9,3
C	16-28	0,77	11,8	2,8	0,25	0,06	1,8	0,24	7,8	2,4	9,5
D	28-45	0,76	9,4	1,7	0,25	0,05		0,19	3,8	3,3	13,5
F	60-75	0,64	8,7	2,2	0,23	0,06	1,9	0,25	5,2	6,1	18,5
H	90-110	0,69	7,8	2,5	0,20	0,06		0,32	5,7	3,6	17,5
I	150-160	0,63	10,0	2,8	0,24	0,08	1,9	0,32	6,0	3,9	15,0
18	250-260		9,4	2,9	0,22	0,07		0,31		3,6	

Le rapport fer libre/fer total est plus élevé dans les horizons B que dans les horizons C. En remontant vers les horizons organiques le rapport fer libre/fer total augmente à nouveau bien que les quantités dosées diminuent en valeur absolue (cf. tableau n° B 16 pour le profil CA 1 de Basse-Casamance et n° B 17 pour le profil A de la toposéquence). Ajoutons qu'un certain nombre de dosages ont été effectués après attaque nitrique. Ce fer, dit total nitrique, représente des valeurs comprises entre celle du fer libre et celle du fer total triacide. Son interprétation est malaisée.

En définitive, la pédogénèse se traduit par une augmentation du pourcentage de fer libre par rapport au fer total. Les sols rouges sont donc des sols à hydroxydes presque entièrement individualisés, c'est-à-dire situés hors des minéraux primaires ou secondaires.

3.3 - Le fer "combiné"

Rappelons qu'il s'agit d'une donnée calculée représentant la différence entre le fer triacide total et le fer libre. Selon les profils il représentera de 5 à 25 % du fer triacide, mais son total est pratiquement toujours inférieur à 1 % en valeur absolue. Aucune conclusion sûre ne peut être tirée de ce fer "combiné" calculé.

TABLEAU N° B 17 - Les formes du fer dans la toposéquence de Casamance :
Profil A

N°	Horizons	Fer total triacide	Fer libre	Fer amorphe	Fer cristallisé libre	Fer "combiné"	Fer amorphe/fer libre
411	A	1,15	0,90	0,52	0,38	0,25	0,58
420	B	4,30	3,68	2,66	1,02	0,62	0,72
429	B	4,75	3,82	2,70	1,12	0,93	0,71
433	B	5,00	4,70	3,50	1,20	0,30	0,74
438	BC	5,00	4,31	2,90	1,41	0,69	0,67
540	C	4,50	4,15	2,26	1,89	0,35	0,54
546	C	4,25	4,10	0,80	3,30	0,15	0,19

3.4 - Les hydroxydes cristallisés

Si l'on tient compte à la fois des résultats des analyses physiques et des analyses chimiques, il devient possible d'avancer les conclusions suivantes :

- Le plus souvent l'hématite est signalée dans les horizons profonds, la goethite dans les horizons moyens et supérieurs des profils. Mais dans le cas particulier du profil A de la toposéquence Casamance, c'est l'inverse qui se produit.
- Il y a une diminution des quantités de fer cristallisé en progressant des horizons C vers les horizons B, en particulier dans le profil sur sables de Haute-Volta (cf. tableau B 16). Par contre, dans le profil CA 1 de Casamance, il y a un maximum apparent de teneurs en hydroxydes dans la partie centrale des horizons B.
- Dans les horizons supérieurs le fer cristallisé disparaît d'après les analyses physiques ou diminue fortement en valeur absolue d'après les analyses chimiques.
- En valeur relative par rapport au fer total, l'importance du fer cristallisé diminue des horizons C aux horizons B et A.

Ainsi, la diminution du fer cristallisé est bien un fait d'origine pédogénétique.

3.5 - Les formes amorphes

3.5.1 - Réalité des formes amorphes

L'existence de formes amorphes dans les sols a été signalée par plusieurs auteurs, en particulier TAYLOR (1959), CAILLÈRE et HENIN (1961), SOILEAU (1962), MITCHELL, FARMER et MC HARDY (1964), FURTADO SANCHEZ et HERBILLON (1964). Ces derniers auteurs notent la nécessité d'extraire la fraction amorphe pour améliorer la qualité des diagrammes RX, tandis que HERBILLON et TRAN-VINH-AN (1964) soulignent l'importance des produits amorphes ferrugineux dans les sols rouges du sommet des chaînes de sol. Plus récemment, HERBILLON, PECROT et VIELVOYE (1966) relient la couleur rouge à la présence d'amorphes ferrugineux, tandis que HERBILLON, FRANKART et VIELVOYE (1966)

précisent que les amorphes peuvent représenter de 5 à 11 % de la fraction argileuse des ferralsols. Enfin PIAS (1968) indique la présence de fer amorphe dans les sols rouges sur grès du Continental terminal du Tchad.

La mise au point par SEGALEN (1968 b) d'une méthode de détermination des produits amorphes (Fe, Si et Al), nous a permis d'approfondir cette question. La technique de dissolution préférentielle préconisée extrait plus rapidement le fer des formes dites "amorphes" que le fer cristallisé. Le dosage est déterminé par une méthode graphique après un minimum de sept extractions successives. C'est l'absence de pics caractéristiques sur les diagrammes RX et ATD qui a permis de conclure à des corps non cristallisés. Les composés ferrugineux amorphes sont donc des constituants mal définis, qui ne sont pas décelés par les rayons X, et qui sont extraits très rapidement par HCl 4N. Dans la suite, c'est en se référant à ces caractéristiques que nous utiliserons le mot amorphe sans vouloir lui donner un sens plus précis sur le plan physico-chimique. En effet, nous n'excluons pas l'hypothèse que la fraction déterminée comme amorphe soit à l'état crypto-cristalline, ou cristallisée avec une taille extrêmement fine. Cette taille expliquerait les phénomènes de couleur (états de surface), et de facilité de migration.

Etudiant un certain nombre de sols tropicaux, SEGALEN est arrivé à la conclusion que les prélèvements de sols rouges sur grès sont parmi les plus riches en composés amorphes ferrugineux, et qu'ils n'ont parfois aucune trace de produits cristallisés. Les teneurs qu'il détermine par la méthode graphique représentent de 36 à 66 % du fer total triacide. De plus, au cours des extractions successives, il observe la disparition plus ou moins rapide de la couleur rouge des prélèvements, ce qui l'a incité à relier cette coloration essentiellement aux états de fer (SEGALEN 1969). Ses conclusions sont que la disparition des composés amorphes découvre des produits cristallisés incolores, comme les minéraux argileux et le quartz, et des composés cristallisés, colorés en jaune comme la goéthite, ou en rouge comme l'hématite. Cela signifie que le problème de rubéfaction peut être relié, soit à la présence d'amorphes ferrugineux,

soit à la présence d'hématite. Cette liaison fer amorphe-couleur rouge a été confirmée dans d'autres travaux récents sur des sols méditerranéens : LAMOUREUX (1968), LAMOUREUX et SEGALEN (1969)

3.5.2 - Mise en évidence des amorphes

a) le fer amorphe dans les sols rouges du Dahomey

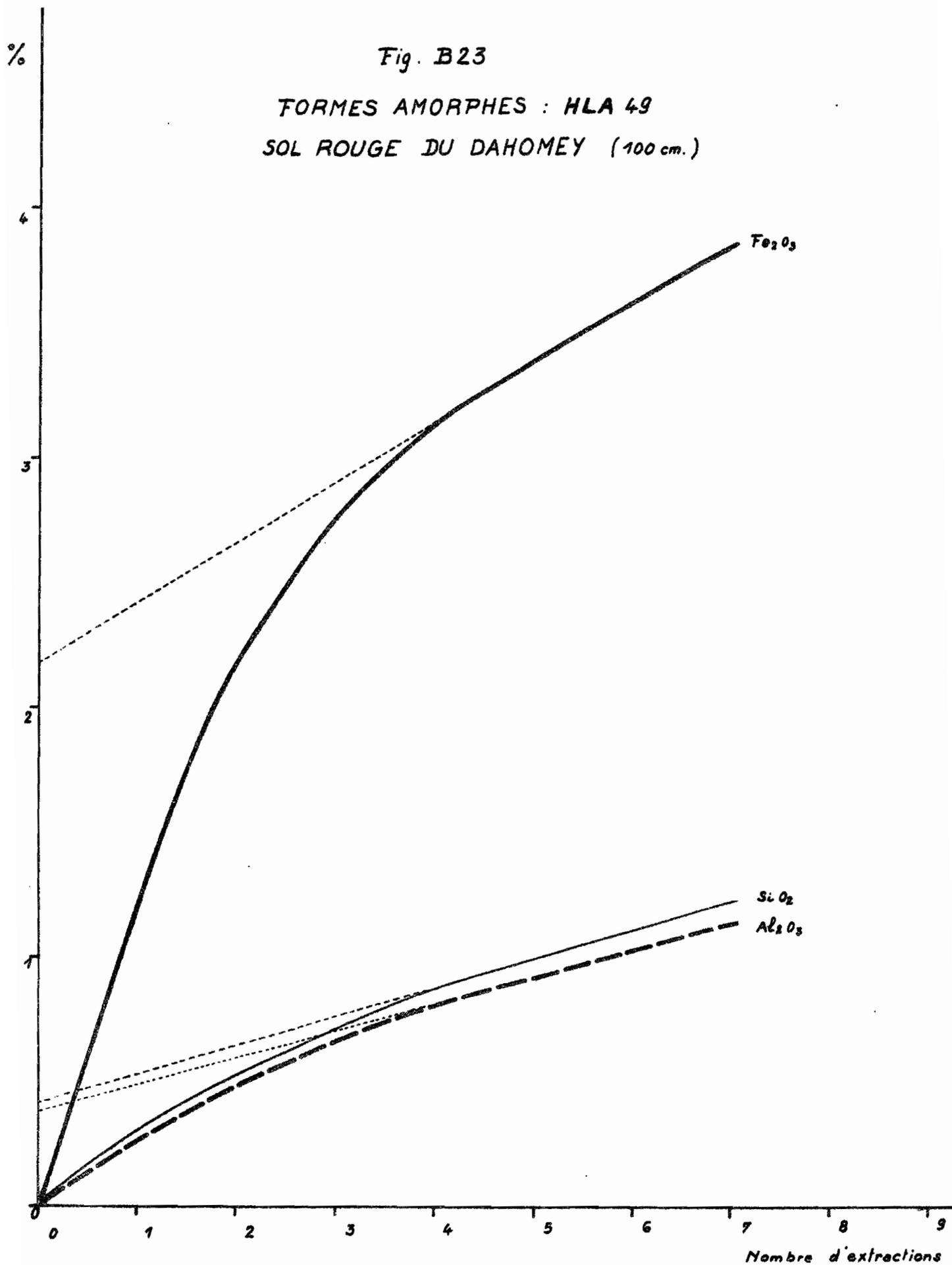
La figure B 23 présente l'analyse, par la méthode SEGALEN, de l'échantillon HLA 495, horizon B₂ d'un sol rouge du Sud Dahomey. Cet horizon situé à 150 cm de profondeur contient 50,2 % d'argile granulométrique. La teneur en fer amorphe est de 2,1 % sur 5,1 % de fer libre. Le complément se rapportant au fer cristallisé, serait représenté par de l'hématite et de la goethite, qui ont été effectivement repérés par les rayons X.

b) le fer amorphe dans les sols "rouges" de Casamance

Les quantités de fer amorphe ont été dosées dans de nombreux profils de Casamance. La figure B 22 en présente quelques résultats. Dans la toposéquence de Séfa, c'est le profil A qui a été particulièrement étudié, avec quelques profils latéraux entre les profils A et C. Les teneurs en fer amorphe croissent en allant des horizons C vers les horizons B₂, puis décroissent en remontant vers les horizons B₁ puis les horizons appauvris. (cf. tableau n° B 17). Mais le rapport entre les quantités de fer amorphe et de fer libre augmente fortement depuis les horizons C, où il est de l'ordre de 0,19 jusqu'aux horizons B₂, où il est de 0,74. Puis ce rapport diminue légèrement, 0,58 dans l'horizon organique. Le fer cristallisé, comme le fer amorphe, continue cependant à décroître en valeur absolue dans les horizons organiques. La figure B 24 présente une série des courbes d'extractions cumulées du profil A, à partir desquelles ont été calculés les résultats précédents. On observe que les courbes successives présentent des formes légèrement différentes.

- Pour les horizons C les courbes ont une allure sigmoïdale. TOBIAS (1969), a abouti également au dessin de courbes de cette forme. Son étude sur la cinétique de dissolution du fer attire l'attention sur l'existence possible

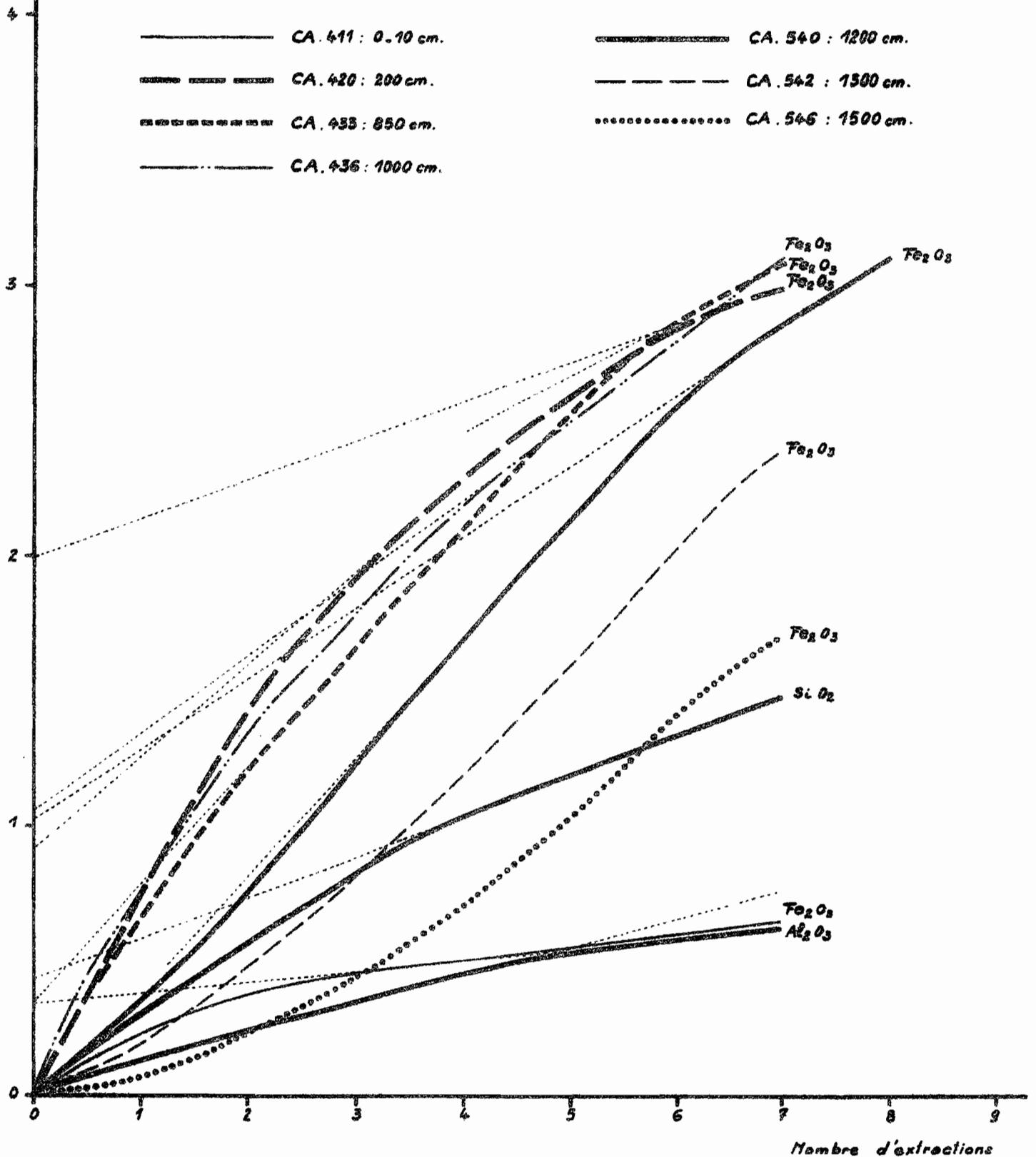
Fig. B23
FORMES AMORPHES : HLA 49
SOL ROUGE DU DAHOMEY (100 cm.)



%

Fig. B24

FORMES AMORPHES DU PROFIL A DE LA
TOPOSÉQUENCE DE CASAMANCE



de plusieurs composés. Nous pensons que la cinétique de dissolution dépend de la nature de ces composés, mais elle peut dépendre aussi de l'état de division des produits. Dans le cas de l'échantillon CA 546, le fer "amorphe" est peu important, il ne représente que 20 % du fer cristallisé. Sur le graphique on obtient une sigmoïde qui traduit probablement la dissolution des composés cristallisés, et ceux-ci sont essentiellement de la goethite, d'après les rayons X.

- Dans les horizons B, les courbes sont d'allure parabolique et le fer amorphe constitue l'essentiel du fer libre. Mais il est apparu que des difficultés surgissaient parfois dans le tracé des tangentes. Une nouvelle série d'analyses a été effectuée. Elle a prouvé que le dessin des tangentes ne pouvait se faire valablement qu'après avoir effectué un nombre d'extraction de 10 à 12, et non seulement de 7. Les teneurs en fer amorphe ainsi déduites sont plus élevées, mais elles ne dépassent cependant pas 3,5 %. De l'hématite est décelée aux rayons X, dans les échantillons non traités. Au fur et à mesure de l'extraction des amorphes, cette hématite disparaît. Sa vitesse de dissolution est assez rapide (notons cependant que la séparation hématite-goethite est délicate en présence de kaolinite).

Ces résultats montrent :

- d'une part, que l'extraction du fer amorphe est très progressive. Cela s'explique peut-être par la constitution en pseudo-particules, la libération du fer amorphe commençant par les couches extérieures de ces agrégats complexes. Le fer cristallisé étant extrait en même temps que l'amorphe bien qu'à une vitesse plus lente, la séparation des deux formes est de ce fait rendue délicate.
- d'autre part, que le problème du fer cristallisé est mal résolu; Il n'y a parfois pas de trace de goethite ou d'hématite décelée aux rayons X, bien que le calcul en prévoit entre 1 et 2 %. On peut envisager l'existence, soit de deux catégories d'amorphes à vitesse de dissolution différente, soit de corps à l'état crypto-cristallin. Si la couleur du sol est due surtout au fer amorphe, de faibles quantités d'hématite ont peut-être un rôle non négligeable. C'est en particulier le cas dans les horizons B du profil A de la toposéquence où la couleur peut être due aux deux catégories de produits.

Dans le profil CA 1 de Basse-Casamance, les teneurs en fer triacide sont assez faibles. La rubéfaction est normale, même quand les quantités de fer total descendent à moins de 1 % dans les horizons appauvris. Les analyses physiques n'ont pas mis en évidence de fer cristallisé dans ce profil. Mais les quantités calculées y sont faibles, et on se trouve probablement très en dessous du seuil de sensibilité de l'analyse. De ce fait, la couleur a de grandes chances d'être occasionnée essentiellement par les produits ferrugineux amorphes.

c) Le fer amorphe dans les sols de Haute-Volta

Nous avons vu que les pourcentages de fer amorphe sont souvent relativement élevés par rapport au fer total dans les sols rouges les plus argileux du Sénégal et du Dahomey. En Haute-Volta, les premiers chiffres obtenus étaient moins importants. Cela a incité à augmenter le nombre d'extractions dans le cas du prélèvement HF 336 pour lequel la construction graphique était délicate. Ce n'est qu'au bout de 12 extractions que la détermination de la tangente a réellement été possible. Elle a indiqué un taux d'amorphe de 3,0 %. Le fer libre, soit 3,81 %, a été enlevé au bout de 14 extractions. Le total de 4,0 % de fer enlevé a été atteint au bout de 19 extractions, alors que le fer total triacide est de l'ordre de 4,6 %. Les amorphes représentent donc presque 80 % du fer libre et 65 % du fer total. SEGALEN (1968 a) a obtenu également des teneurs de plus de 50 % de fer à l'état amorphe pour des sols de Godomey. Effectuant des contrôles par les rayons X, et en suivant l'évolution de la couleur au fur et à mesure des extractions, il note que l'échantillon ne comporte que de la goéthite, et qu'elle est rapidement dissoute. La couleur du sol est donc due, exclusivement, au fer à l'état amorphe.

3.5.3 - Conclusions

- Le fer dit "amorphe" représente une part très importante du fer à l'état libre. Dans de nombreux cas, ce fer amorphe semble le seul responsable de la couleur rouge des sols. Dans quelques autres cas, la présence de produits cristallisés, comme l'hématite, est une cause complémentaire de rubéfaction.

- Il y a accumulation de fer amorphe dans les horizons B par rapport aux roches-mères. Si une partie de l'enrichissement peut être expliqué par un départ de silice, il est indéniable que le fer possède une certaine mobilité. Il apparaît donc que la fraction mobile est constituée essentiellement par le fer à l'état amorphe. Ce dernier est piégé par les surfaces argileuses et il conduit à la formation des pseudo-particules. Leur statilité explique probablement le nombre élevé d'extractions à effectuer avec la méthode SEGALEN. Ce résultat pose le problème des relations entre le fer et les surfaces argileuses.

D - LES LIAISONS DU FER AVEC LES CONSTITUANTS DU SOL

1) Les liaisons avec les minéraux argileux

Nous examinerons successivement les données fournies sur cette question par d'autres chercheurs, surtout dans les régions tropicales, puis les résultats que nous avons obtenus.

1.1 - Données bibliographiques

Trois groupes de résultats nous intéressent, qui concernent les examens au microscope électronique, les essais de déferrification, l'appréciation du rôle des composés amorphes.

a) Les examens au microscope électronique

Plusieurs auteurs ont étudié les liaisons entre les kaolinites et les composés ferrugineux : D'HOORE, FRIPIAT et GASTUCHE (1954) ont précisé le mode de saturation en oxyde de fer à la surface des argiles. Mais ces travaux reposent en particulier sur ceux de FRIPIAT et GASTUCHE (1952). Ces derniers observent au microscope électronique deux variétés d'oxydes de fer, liées à des kaolinites du Congo, dont l'une était caractérisée par des agglomérations plus denses, en des points privilégiés des surfaces. Ces "oxydes de recouvrement des surfaces argileuses" disparaissent

à vitesse inégale lors des déferrifications, en même temps que la décoloration se poursuit. En 1965, FOLLETT, suggère que la couche tétraédrique de la kaolinite est probablement le site de fixation des colloïdes ferrugineux, particulièrement ceux extraits par le dithionite de sodium. TRAN-VINH-AN (1967) effectue le même type de recherche sur divers prélèvements, dont un provenant d'un profil de sol rouge sur grès du Sud-Dahomey. Il définit la présence d'oxydes de fer très résistants, et de formes amorphes. Avant le traitement au dithionite, les oxydes de fer se trouvent sous formes de pontuations accrochées aux faces des argiles, et d'agrégats amorphes très contrastés, sans liaison avec les minéraux argileux. Les traitements font disparaître les amas amorphes en premier, puis les micro-concrétions disparaissent ensuite. A ce moment les plaquettes de kaolinite s'agglomèrent. Enfin, GREENLAND, OADES et SHERWIN (1968) ont étudié la fraction argileuse de quelques sols d'Australie et ils ont montré que les oxydes de fer libre étaient présents sous forme de petites particules de 50 à 100 Å de diamètre. Ils n'ont cependant pas observé de liaison nette entre ces particules et les faces des feuillets de kaolinite.

b) Les effets des traitements de déferrification

DESHPANDE, GREENLAND et QUIRK (1964 et 1968) démontrent que le traitement des sols ferrallitiques d'Australie par des mélanges de dithionite se traduit par un accroissement des taux d'argile. GASTUCHE (1953), CARROLL (1958) et DUCHAUFOUR (1965) insistent tous sur le fait qu'une modification de l'équilibre des liaisons fer-argile se traduit par un changement dans la mobilité de ces deux constituants. De plus, cette modification de l'équilibre se traduit souvent par une variation de la capacité d'échange de la fraction argileuse. C'est la conclusion de FIELDDES (1952), de FRIEDLAND, TSYURIPA et ANDRE-YEVE NA (1966). DAVIDTZ et SOMMERNE (1965), observant l'augmentation des charges de la kaolinite après déferrification de sols ferrallitiques, considèrent que les oxydes de fer bloqueraient surtout les bords et les bouts des minéraux argileux. Mais LEAL SILVA et SEGALEN (1968) ne pensent pas que le fer occuperait des positions d'échange de l'argile, la kaolinite ayant d'ailleurs des charges faibles.

c) Le rôle des composés ferrugineux amorphes

Pour FOLLETT (1965) le fer amorphe formé dans le sol est immédiatement adsorbé sur les surfaces des particules argileuses et il joue un rôle sur la variation de la capacité d'échange. FIELDER et PECROT (1966) notent que la capacité d'échange de la kaolinite est augmentée en présence de certains produits amorphes. Enfin, FORDHAM (1970) avance la conclusion que la présence de kaolinite accélère la cristallisation des composés ferrugineux.

1.2 - Mise en évidence des liaisons dans les sols "rouges"

Les résultats obtenus par l'utilisation de différentes méthodes sont les suivants :

a) Examens par microscopie électronique

Les photographies effectuées au microscope électronique sur des prélèvements en provenance de Haute-Volta et de Casamance montrent des unités ferrugineuses de la taille du 1/10 de micron. Elles sont, soit juxtaposées à des cristaux de kaolinite, soit apparemment accolées aux faces de ces cristaux. Dans certains cas, il y a des plaquettes d'illite entourées d'un cortex ferrugineux (interprétation par SIEFFERMANN). Il apparaît donc bien deux types de répartition des oxydes de fer autour des argiles.

b) Les rapports teneurs en fer/teneurs en argile

Les rapports entre les teneurs en fer libre et celles en argile granulométrique sont remarquablement constants dans un même profil. Ainsi, dans le profil A de Casamance, le fer libre varie de 2,7 à 4,7 %, mais le rapport fer libre/argile n'évolue qu'entre 0,74 et 0,78. Dans l'ensemble des profils, mais sur les seuls horizons B, les rapports fer total triacide sur argile granulométrique s'étagent entre 8 et 13 %, ceux de fer libre sur argile entre 6 et 10 %. Une étude par ordinateur effectuée en collaboration avec VAN DEN DRIESSCH indique que le rapport du fer libre à l'argile est de 0,06 pour $n = 29$ prélèvements d'horizons B au Sénégal et au Dahomey. Ce rapport est de 0,13 pour les horizons A correspondants. La constatation d'un rapport fer libre/argile compris généralement entre 6 et 10 %, .

chiffres probablement légèrement par défaut compte tenu de l'imprécision relative au fer libre, concorde avec les conclusions de D'HOORE (1954), pour lequel la valeur de 12 % paraît correspondre à la saturation de la surface des argiles kaolinitiques en oxydes de fer. Au-dessus de cette valeur il se formerait des concrétions. Cette valeur de 12 % de fer libre/argile est atteinte dans certains horizons de surface.

Dans le cas des sols rouges, l'inexistence de concrétions, même sur des roches-mères relativement riches en fer, pourrait être expliquée par une élimination du fer éventuellement en excès, dans un milieu très ouvert et à drainage stable dans le temps. Le fer éliminé se mettrait en place dans les horizons G, où il déclencherait le départ de silice et la constitution des pseudo-particules. Dans cette hypothèse, la pédogénèse ferait converger les profils vers un type d'horizon B, où le rapport fer libre/argile serait au maximum de 12 %. Le seuil de 50 à 55 % de teneurs en argile granulométrique pourrait correspondre à la limite de stabilité d'un équilibre fer/argile/quartz dans un milieu suffisamment "ouvert".

c) Les capacités d'échange du sol et les teneurs en fer

Dans les sols de Casamance, le rapport T/A (T = capacité d'échange mesurée à l'acétate d' NH_4 à pH 7, A = argile granulométrique), est très constant. Dans toute l'épaisseur rubéfiée il se situe entre 10 et 12 milliéquivalents pour 100 grammes d'argile. Il augmente dans les horizons supérieurs jusque 80, du fait de la présence des composés organiques. Dans les matériaux originels, il varie de 8 à 11 mé/100 grs. La capacité d'échange de la kaolinite étant de l'ordre de 12 mé/100 grs, ce résultat concorde bien avec ce que l'on sait de la fraction argileuse : d'une part, kaolinite comme minéral argileux unique, d'autre part présence de produits non aluminés dans la fraction de 0 à 2 microns. Cependant, dans certains sols du Dahomey la capacité d'échange de l'argile peut atteindre 16 à 18 mé %. Or les échantillons sont non seulement riches en fer libre, mais également relativement riches en sa fraction amorphe. Comme l'existence éventuelle de métahalloysite n'a pas pu être mise en évidence, l'augmentation de la capacité d'échange semble donc bien être en relation étroite avec la richesse en fer amorphe.

d) Conclusions

Les résultats acquis dans le cas de sols "rouges" concordent avec ceux obtenus par de nombreux auteurs sur des sols tropicaux. Tout indique qu'il y a une liaison étroite entre le fer libre et les surfaces argileuses. Précédemment, CHAUVEL avait démontré que c'était la fraction amorphe du fer qui cimentait les pseudo-sables. Tout laisse à penser que cette forme de fer joue le rôle essentiel dans l'équilibre fer/argile qui est une caractéristique des horizons B rubéfiés.

2) Les relations entre le fer et les autres constituants des sols

Les constituants principaux du sol autres que le fer sont l'aluminium, le silicium et le titane. Des liaisons entre le fer et l'aluminium existent par l'intermédiaire de la kaolinite, silicate d'alumine. Elles viennent d'être abordées. Les effets réciproques que pourraient avoir les composés ferrugineux libres avec des composés alumineux libres, non silicatés, n'ont pas été décelés. En particulier, les quantités d'alumine amorphe ne semblent pas être influencées par celles de fer libre. La proportionnalité qui existe entre les teneurs en fer et en titane dans les horizons B reflète l'équilibre qui s'est organisé à ce niveau. On en déduit la faible mobilité du fer dans ces horizons, mais il ne semble pas y avoir action réciproque entre éléments.

Par contre, les interréactions possibles du silicium et du fer sont beaucoup plus probables. Précédemment, l'effet des solutions ferrugineuses arrivant dans un milieu riche en quartz a été décrit. Il y a pénétration du fer dans les fissures du quartz. Ces dernières n'étaient pas toutes préexistantes, ce qui laisse supposer un effet du fer sur la fragilité des quartz. L'acquisition de cette dernière est peut être la conséquence d'effets d'hydratation, ou de cristallisation des composés ferrugineux introduits dans les quartz. Mais la présence de nombreuses caries indique que le fer a peut être une influence sur la mise en solution de la silice. Cette dernière peut être provoquée par la seule percolation de solutions du sol contenant moins de 6 ppm de silice. Mais l'hypothèse d'une modification du diagramme d'équilibre quartz-silice soluble en présence de fer n'est pas à rejeter.

D'un autre côté, l'influence de la silice solubilisée sur la dynamique du fer a été envisagé par plusieurs auteurs. Citons REIFENBERG (1935) pour des sols méditerranéens, DEMOLON et BASTISSE (1944), puis BASTISSE (1949 et 1967) sur le rôle vecteur de la silice dans la dispersion du fer. TRICHET (1963) poursuivant ce type de recherche de laboratoire sur les complexes du fer et de la silice, conclut au comportement spécial du fer en présence de silice. Ultérieurement, TRAN-VINH-AN et HERBILLON (1966), reprenant les conclusions de MILLOT (1964) sur la solubilité de la silice, donnent un rôle important à ce dernier élément dans la stabilisation de l'état amorphe des oxydes et hydroxydes de fer. Enfin, TRAN-VINH-AN (1967) précise que l'introduction de silice favorise l'obtention de produits désordonnés rouges. Il indique que des quantités même très faibles de silice peuvent avoir un pouvoir inhibiteur élevé sur la cristallisation du fer.

En définitive, les conclusions à tirer sur les relations entre le fer et la silice, tant des observations faites sur les sols rouges que des recherches de divers auteurs sont les suivantes :

- la présence probable de silice dans les solutions du sol pourrait expliquer, ou du moins faciliter, la conservation du fer à l'état amorphe dans les horizons B. Cette conclusion n'exclut cependant pas le rôle d'autres constituants comme les composés organiques.
- l'accélération de la désilicification des quartz par l'importation du fer dans le milieu, et la stabilisation à l'état amorphe du fer importé du fait de la silice soluble, expliquent la stabilité de l'équilibre qui existe dans les horizons B des sols rouges. Le déséquilibre qui apparaît dans les horizons supérieurs est donc dû à des actions nouvelles. Seule la matière organique peut les expliquer.

E - LES INTERPRETATIONS ET LES CONCLUSIONS SUR LA RUBÉFACTION

Les différents résultats ou interprétations qui précèdent peuvent être regroupés. Ils conduisent à plusieurs conclusions intéressantes.

1) Les formes du fer et la rubéfaction

- La plus grande partie du fer des sols "rouges" est à l'état libre, dégagé des minéraux primaires ou secondaires. 50 à 80 % de ce fer libre se trouve à l'état dit "amorphe", et c'est essentiellement à ce fer dosé comme amorphe, quelle que soit sa constitution, qu'est due la rubéfaction caractéristique des horizons B.

- Le phénomène de rubéfaction correspond à une accumulation de fer libre par rapport à l'argile, jusqu'à un taux de l'ordre de 10 à 12 %. Lorsque le fer est en excès par rapport à ce taux, il y a élimination hors du profil. Ce fer lessivé permet l'approfondissement des sols, car il se fixe sur les surfaces argileuses des horizons C. Cette fixation se traduit par l'individualisation de pseudo-particules, dans lesquelles sont inclus des quartz morcellés par imprégnation ferrugineuse.

- La création des pseudo-particules donne l'apparence d'une texture plus sableuse, et elle induit des conditions de drainage stable et de bonne qualité. Ces conditions de milieu ouvert facilitent la mobilité de la silice. Milieu ouvert, donc oxygéné, et mobilité de la silice soluble conjuguent leurs effets pour la conservation de la rubéfaction. FRIPIAT et GASTUCHE (1952) avaient déjà indiqué que la kaolinite H adsorbe l'hydroxyde de fer avec formation d'une structure désordonnée où chaque hydroxyde engendre une nouvelle surface. Toute variation vers l'augmentation de particules grossières tend alors à favoriser l'immobilisation. Il y a auto-accélération du phénomène, probablement jusqu'à un certain seuil.

- Le rôle du fer cristallisé est peu apparent, mais la présence d'hématite est une cause secondaire de rubéfaction. La cristallisation du fer qui s'est introduit dans les fissuration des quartz explique peut être leur éclatement ultérieur. C'est pourquoi une partie du fer cristallisé (ou peut-être à l'état crypto-cristallin), reste inclus dans les pseudo-particules.

- Sur le plan physico-chimique, l'état amorphe n'est pas stable, et une modification du pédoclimat, avec arrêt de l'alimentation en silice ou en produits organiques des solutions, pourrait se traduire par une cristallisation progressive des hydroxydes de fer. Pour GASTUCHE (1953) et pour ALEXANDER et GADY (1962) cette évolution vers la cristallisation explique l'induration des cuirasses. Cependant SEGALEN (communication personnelle) pense que le passage préalable du fer à l'état soluble est indispensable pour pouvoir conduire à un nourrissage des cristaux.

- Enfin l'importation du fer dans les horizons C, et le piègeage de ce fer sur les surfaces argileuses, se traduisent par la rubéfaction. Cette dernière est donc un phénomène qui se réalise en profondeur dans les sols. On arrive donc, par d'autres méthodes, à la confirmation des conclusions de la première partie.

2) Les bilans du fer

2.1 - L'origine du fer

Le fer existe dans les niveaux sédimentaires en proportions très variables. Les formes cristallisées y sont généralement dominantes, sauf sous les horizons C de sols, ce qui souligne la possibilité de transformations profondes des matériaux originels par les eaux de percolation. Au niveau des nappes, également, il semble que le fer cristallisé soit moins bien représenté. C'est donc surtout à partir des formes cristallisées que la pédogénèse (au sens large) crée le fer amorphe, dont les possibilités de mobilisation sont plus élevées.

2.2 - La concentration des amorphes dans les profils

La pédogénèse aboutit à une concentration du fer amorphe dans le milieu.

- a) en diminuant les teneurs en fer cristallisé et en fer inclus dans des minéraux primaires ou secondaires.
- b) en important du fer amorphe par lessivage. La migration de ce fer amorphe est réelle, l'enrichissement relatif de certains pseudo-particules en est une preuve. L'hypothèse que le fer amorphe serait des hydroxydes cristallisés très finement pulvérisés expliquerait la facilité de lessivage de la fraction dite "amorphe". Mais la migration du fer amorphe semble se faire à faible distance. Le mécanisme se réalise par transits successifs, car l'élément est rapidement piégé tant que les surfaces argileuses ne sont pas saturées.
- c) en créant un enrichissement relatif en fer par départ de silice du milieu, en particulier dans les horizons C,

En définitive, le phénomène de rubéfaction des sols rouges représente donc plus qu'une simple coloration. Il traduit un mécanisme pédogénétique de concentration en fer amorphe dans les horizons B. Cette concentration est précédée d'une homogénéisation des teneurs, et dans certains cas d'une élimination des excès locaux.

2.3 - Le bilan du fer à l'échelle de la toposéquence

A l'échelle de la toposéquence les résultats sont moins assurés compte tenu des difficultés de détermination des matériaux originels des profils de haut de pente. Cependant il est sûr que l'épaisseur rubéfiée diminue du haut vers le bas de la pente. Le front de rubéfaction se rapproche de la surface, peut-être par une augmentation de l'importance de l'ablation par érosion vers le bas des pentes. Par contre, l'épaisseur des horizons C, à ferrisation hétérogène, augmente vers la partie inférieure de la toposéquence

indiquant une plus grande mobilité du fer. A cela s'ajoute une tendance à la perte de la rubéfaction dans les horizons supérieurs, premier stade du passage aux sols "associés" de couleur beige. Dans ces derniers, il existe généralement des concrétions ferrugineuses, ce qui indique une dynamique différente du fer par rapport aux surfaces argileuses.

Dans les profils de haut de pente, le rapport Fe/Al et Fe/Ti est généralement plus élevé que dans les profils rouges du reste de la toposéquence. Ce fait peut être interprété comme une concentration en fer relativement plus élevée dans les profils de haut de pente. Cela pourrait expliquer la grande profondeur et la conservation de ces profils lorsque les conditions climatiques deviennent défavorables à la création de sols "rouges"

Enfin, la concentration en fer doit dépendre du climat et de la pluviométrie. Dans les régions à drainage limité l'intensité de la concentration doit être plus faible que dans les régions plus humides. Cela peut être une explication de la texture plus sableuse des profils des régions les plus sèches (observation sur laquelle nous avons insisté en première partie). Cette conception nous conduit à envisager une mesure de l'intensité de la pédogénèse. Dans le cas des sols "rouges", elle pourrait être exprimée par le taux de concentration en fer dans les horizons B par rapport aux taux dans les horizons de départ, c'est-à-dire les roches-mères trouvées dans les profils latéraux. La mesure n'est pas aisée, mais elle représenterait la somme des effets des pédogénèses successives dans le temps.

3) Importance pédogénétique de la rubéfaction

Il est possible de séparer trois types de dynamique du fer libre dans les profils de sols sur grès, le point commun étant toutefois la proportion élevée du fer libre par rapport au fer total.

- a) le cas des sols "rouges" : ils sont en valeur relative riches en produits amorphes.

- b) le cas des sols jaunes : ils sont assez pauvres en fer, relativement aux taux d'argile, mais surtout ils sont très pauvres en produits ferrugineux amorphes. SEGALEN (1970 a) a montré, en effet, que la couleur jaune était surtout due à de la goethite. Mais la gamme des sols étudiés est faible
- c) le cas des sols beiges à concrétions : leur étude n'est pas suffisamment avancée pour généraliser les quelques résultats obtenus, mais il y a apparemment une répartition spéciale du fer par rapport aux argiles.

Dans les trois cas successifs la pédogénèse à un rôle différent :

- en a) elle concentre les amorphes jusqu'à un certain seuil par rapport aux argiles, et elle tend à créer des pseudo-particules. La rubéfaction est synonyme de bon drainage,
- en b) elle lessive le fer "amorphe" hors des profils. C'est le cas des sols jaunes des régions équatoriales, où la pluviométrie dépasse deux mètres,
- en c) il y a lessivage partiel des "amorphes", mais il n'y a pas exportation complète hors des profils. L'accumulation se fait sous forme de concrétions dans les horizons B, et non dans les horizons C.

Ces trois distinctions nous conduisent à formuler les conclusions suivantes :

- Les différents sols sur sables et sur grès, classés en ferrugineux tropicaux beiges, en ferrallitiques rouges et en ferrallitiques jaunes, sont tous des sols à kaolinite. Cette dernière est le minéral argileux exclusif et sa stabilité est très grande dans les profils. Ces sols diffèrent surtout par la dynamique du fer.
- Les sols "rouges" ferrallitiques ont une dynamique de la silice qui est extrêmement importante, et qui conditionne leur morphologie. La libération de silice, expulsée hors des profils, justifie le classement dans les sols ferrallitiques.

- La rubéfaction des sols "rouges" représente un phénomène pédogénétique important, lié à la texture, à la structure, au drainage, aux liaisons fer-argile, à la dynamique du fer. Elle peut donc être retenue à un échelon élevé dans une classification.
- L'importance pédogénétique de la rubéfaction pose le problème de l'équilibre de ce processus. Précédemment, on a vu que cet équilibre reposait sur deux chiffres maxima : l'un de 12 % de fer libre par rapport à l'argile, l'autre de 50 à 55 % de teneur en argile du sol.

Dans les horizons B, cet équilibre semble stable et c'est toujours dans les horizons supérieurs que des indices de déséquilibre ont été relevés. C'est pourquoi l'étude de ces horizons sera entreprise en considérant les horizons B, épais, comme l'équivalent de matériaux originels particuliers.

4) Rubéfaction, grésification et cuirassement

La rubéfaction des horizons B a été valablement considérée comme un caractère diagnostique. Elle reflète l'état d'équilibre de la dynamique du fer et de la silice. Elle est associée à la constitution de pseudo-particules, et elle représente une liaison particulière du fer avec les surfaces argileuses. Nous proposons d'appeler ce fait pseudo-particulation. D'autres modes de liaisons du fer existent, qui apparaissent différentes : en particulier la grésification et le cuirassement. Les enseignements tirés de ce mémoire nous fournissent les hypothèses suivantes de travail pour séparer ces divers phénomènes.

- la grésification par des ciments ferrugineux pourrait être, comme certains auteurs l'ont supposé pour le Continental terminal, une conséquence de la pédogénèse. Mais il s'agirait d'une pédogénèse provoquant une alimentation importante des nappes en fer. En effet, il est net que la grésification est un phénomène de cimentation par épigénie, c'est-à-dire par remplacement d'ions par d'autres. Mais cette épigénie se réalise par importation de fer ferreux seul, et non de fer et d'argile comme dans la pseudo-particulation.

- le cuirassement ferrugineux, (et le carapacement) seraient différents de la grésification. Il s'agirait surtout d'une accumulation de fer dans un milieu, avec une forte augmentation de densité du matériau. Cela n'exclut pas que le cuirassement se réalise en même temps qu'un départ de silice. Il ne s'agirait pas d'une épigénie proprement dite, mais d'une mise en place différente du fer par rapport au squelette. Des conditions de circulation d'eau seraient probablement à l'origine de ces phénomènes : dans un cas, celui de la grésification, intervient une nappe à rH bas, se concentrant et circulant lentement ; dans un autre, celui du cuirassement, il faut envisager une nappe à rH un peu plus élevé, et surtout à circulation latérale rapide.

Le cuirassement et la pseudo-particulation auraient tous les deux pour conséquences des silicifications induites dans le paysage tandis que la grésification se traduirait plutôt par un piègeage des quartz cimentés par le fer. Dans le cuirassement et dans la grésification il y aurait évolution vers la cristallisation des hydroxydes quand les nappes mères disparaissent. Dans le cas de la pseudo-particulation, la stabilité des amorphes serait facilitée par la dynamique de la silice en milieu ouvert.

Ce sont des hypothèses de travail, mais elles reposent sur des observations nombreuses. En tout cas, il est sûr que la création des sols rouges sur grès représente une mise en réserve du fer incompatible avec le développement de phénomènes généralisés de cuirassement.

CHAPITRE VII

LA DIFFERENCIATION DES HORIZONS SUPERIEURS

A - LES FAITS

Les horizons supérieurs des sols "rouges" sur sables et sur grès ont des caractères communs, qui les distinguent nettement des horizons B précédemment étudiés. Ces caractères communs sont matérialisés par la succession de deux horizons qui sont :

- a) un horizon superficiel, d'une couleur grise à grise foncé, enrichi en matière organique, d'épaisseur variable de 5 à 20 cm.
- b) un horizon rouge, parfois d'une teinte plus claire que les horizons B rubéfiés, de texture sableuse à sablo-argileuse en surface, variant progressivement vers le pôle argileux jusqu'au raccordement avec les horizons B homogènes. Cet horizon de transition peut présenter des épaisseurs très variables, de 20 cm à 80 cm, qui ne semblent pas proportionnelles à l'épaisseur des horizons rubéfiés homogènes sous-jacents.

Ces deux horizons, caractérisés par une texture variable dans l'espace, ont été dénommés horizons appauvris, pour rendre compte des valeurs systématiquement plus faibles des teneurs en argile et en fer par rapport aux horizons plus profonds, même si ceux-ci ne présentent pas d'accumulations nettes. Leurs deux caractères morphologiques déterminants sont donc :

- la présence de matière organique.
- le phénomène de l'appauvrissement.

Nous allons les examiner successivement, en retenant les horizons B comme le matériau originel particulier, à partir duquel se sont différenciés tous les horizons supérieurs.

1) Les constituants organiques

L'inventaire des sols, présenté en première partie, a montré le grande variabilité des teneurs en matière organique totale. Les valeurs dépendent des conditions locales, en particulier de la couverture végétale et du passé cultural. Mais une majorité des profils contient entre 1 et 1,5 % de matière organique, dont les C/N sont compris entre 12 et 16. Ces teneurs ne sont pas très élevées et elles diminuent très rapidement dès la profondeur de 20 cm (Melle THOMANN, 1964).

Cependant, les analyses ont montré la présence de matières organiques très profondément dans les profils, généralement jusqu'en bas des horizons rouges. Dans le profil HFA, par exemple il y a entre 1 et 2 pour mille de matière organique totale entre 4 et 7 mètres, c'est-à-dire jusqu'au début de l'horizon de transition vers les roches-mères. Cela n'est pas étonnant car des traces de racines fines ont été souvent observées dans de nombreux profils à plus de 6 mètres de profondeur. Mais l'expression matière organique totale n'est qu'une appréciation du taux de carbone et non des formes humifiées ou non.

1.1 - Les fractions humifiées et leur répartition

En collaboration avec Melle THOMANN (THOMANN et FAUCK, 1971) une étude de la répartition des formes d'humus a été faite sur plusieurs profils de Casamance. Des résultats du même ordre avaient été obtenus précédemment par DUCHAUFOR et DOMMARGUES (1963) sur des échantillons en provenance de profils de cette région. La méthode utilisée sépare différentes formes d'acides humiques et d'acides fulviques (méthode TIURIN modifiée DUCHAUFOR, 1954 a).

La définition des formes est la suivante : (JACQUIN, 1963; Melle THOMANN, 1964).

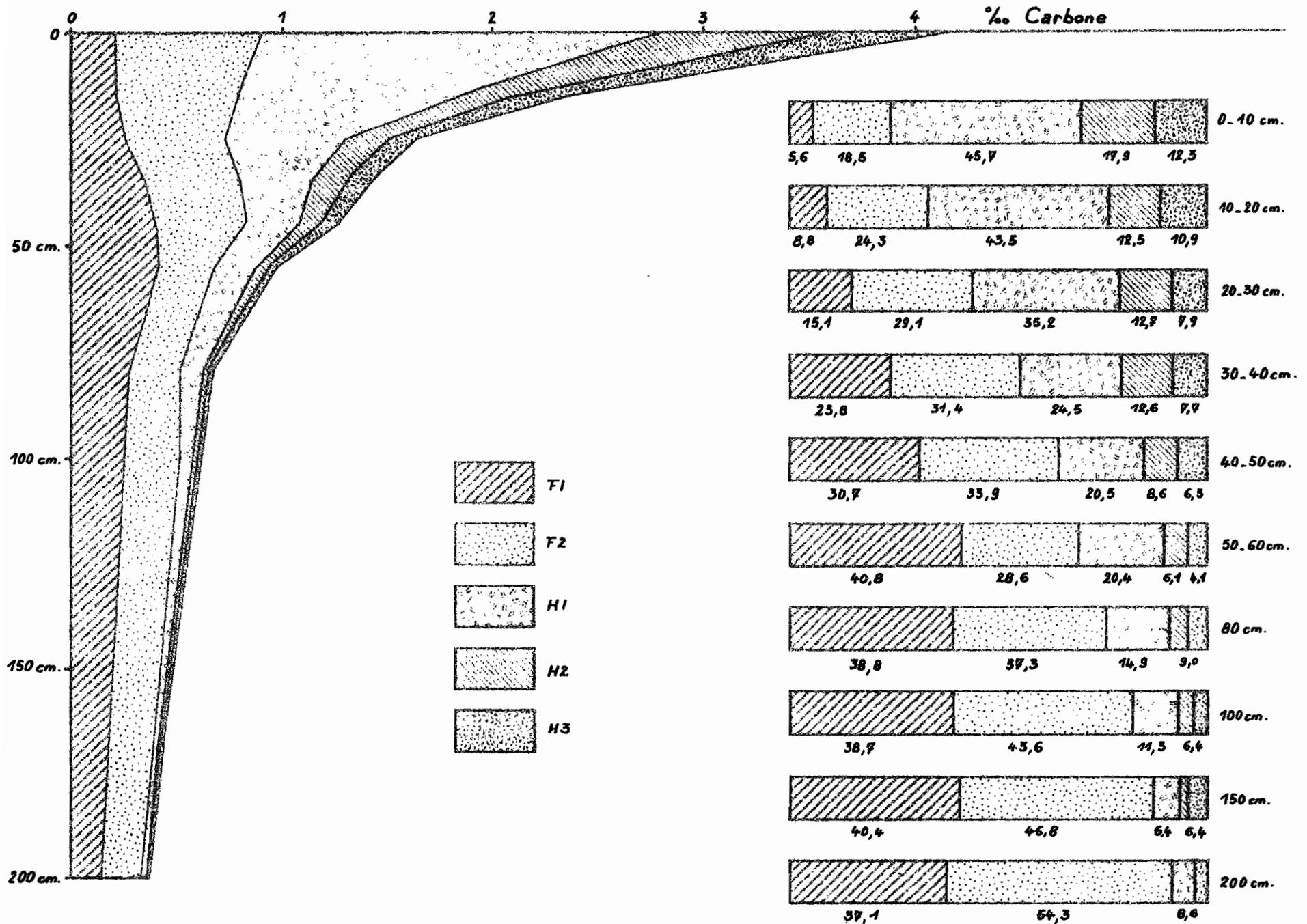
- H₁ acides humiques libres
- H₂ acides humiques liés au Ca⁺⁺
- H₃ acides humiques liés à Fe⁺⁺⁺ et Al⁺⁺⁺
- F₁ acides fulviques libres
- F₂ acides fulviques liés aux acides humiques.

Les résultats obtenus en Casamance, sur une série de profils, sont très homogènes. C'est pourquoi il a été possible de les schématiser en un graphique de répartition dans l'espace (figure B 25). Sur le plan de la matière organique l'examen de ce graphique permet de séparer trois niveaux :

- 0 - 20 cm : les teneurs en carbone total diminuent très rapidement de moitié entre 0 et 20 cm. C'est l'horizon superficiel organique, bien individualisé sur le terrain.
- 20 - 50 cm : la décroissance est plus lente, et il y a des modifications dans la répartition des formes. C'est un sous-horizon que nous appellerons "intermédiaire".
- de 50 cm à plus de 20 cm : la décroissance des teneurs en carbone total est très lente.

Deux remarques s'imposent. D'abord l'horizon dit "intermédiaire" sur le plan de la matière organique, ne correspond pas entièrement à l'horizon rouge appauvri de transition. Il y a donc un troisième sous-horizon de transition et de raccordement aux horizons B homogènes. Ensuite, limiter l'horizon organique à une épaisseur comprise entre 0 et 20 cm, en se basant sur le seul critère de couleur sur le terrain, est donc arbitraire. Les horizons enrichis en constituants organiques peuvent parfois dépasser l'épaisseur de 50 cm, mais les teneurs en valeurs absolue sont alors trop faibles pour une définition de nouveaux sous-horizons.

Fig. B25 - RÉPARTITION DE L'HUMUS DANS UN PROFIL "MOYEN"
DE SOL ROUGE (CASAMANCE)



Dans la répartition des formes humifiées, il y a cependant certaines différences entre les profils. La figure B 26 fournit les résultats du profil A de la toposéquence de Casamance, et la figure B 27 ceux du profil CA 1 de Ziguinchor. De ces deux exemples nous déduisons les répartitions suivantes :

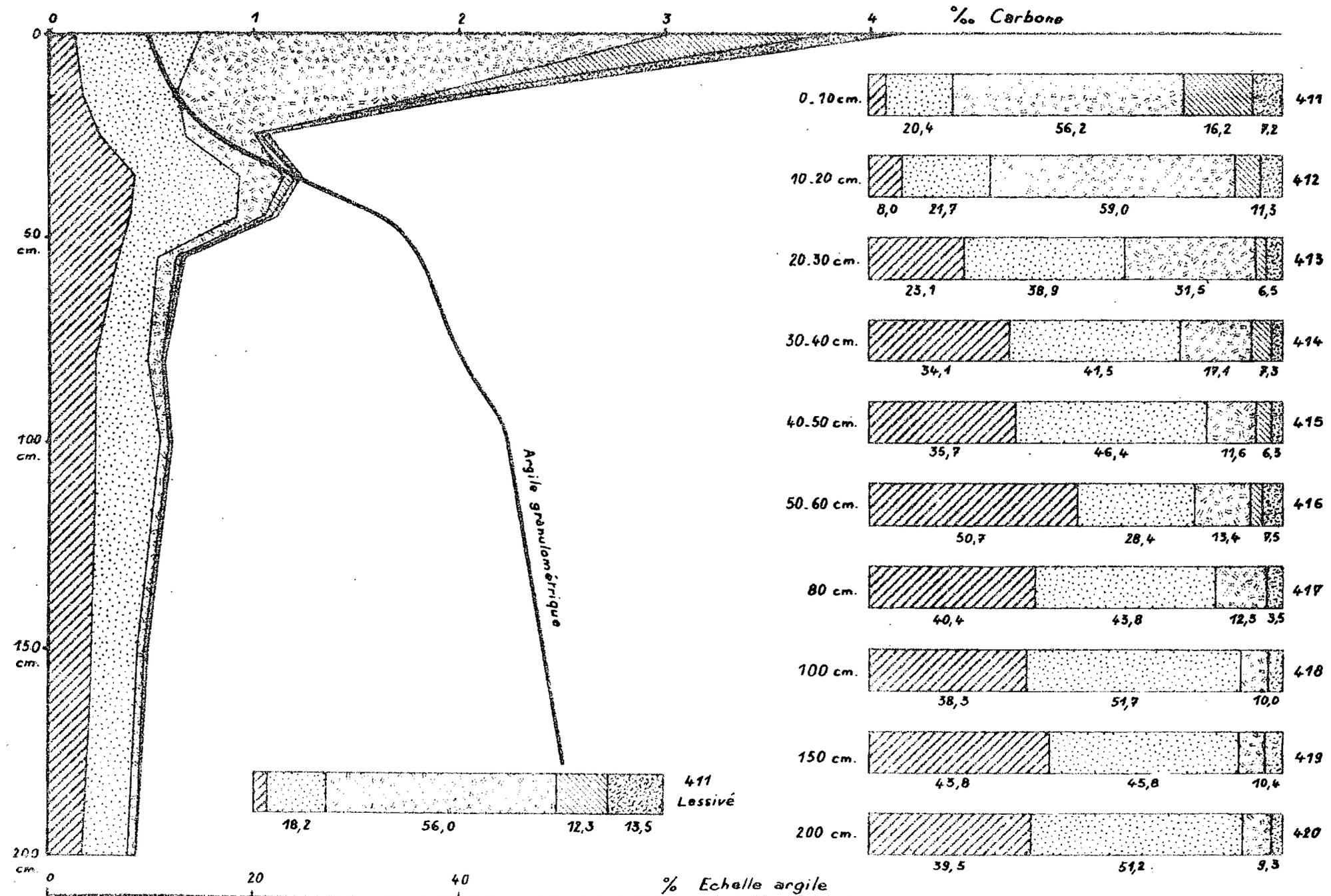
- l'horizon supérieur est très riche en acides humiques, formes peu mobiles. Ces dernières disparaissent très rapidement à mesure que la profondeur augmente puisqu'elles représentent moins de 20 % du total à 50 cm de profondeur. C'est la fraction H₁, acides humiques libres, qui est la plus importante. Cependant, les acides humiques liés au calcium (H₂) existent en quantités notables dans l'horizon le plus superficiel du profil A de la toposéquence, puis disparaissent ensuite. Dans le profil CA 1 de Ziguinchor leur disparition est plus progressive. La forme humique H₃, plus ou moins polymérisée, est peu représentée, pourtant elle est théoriquement considérée comme liée au fer et à l'aluminium.

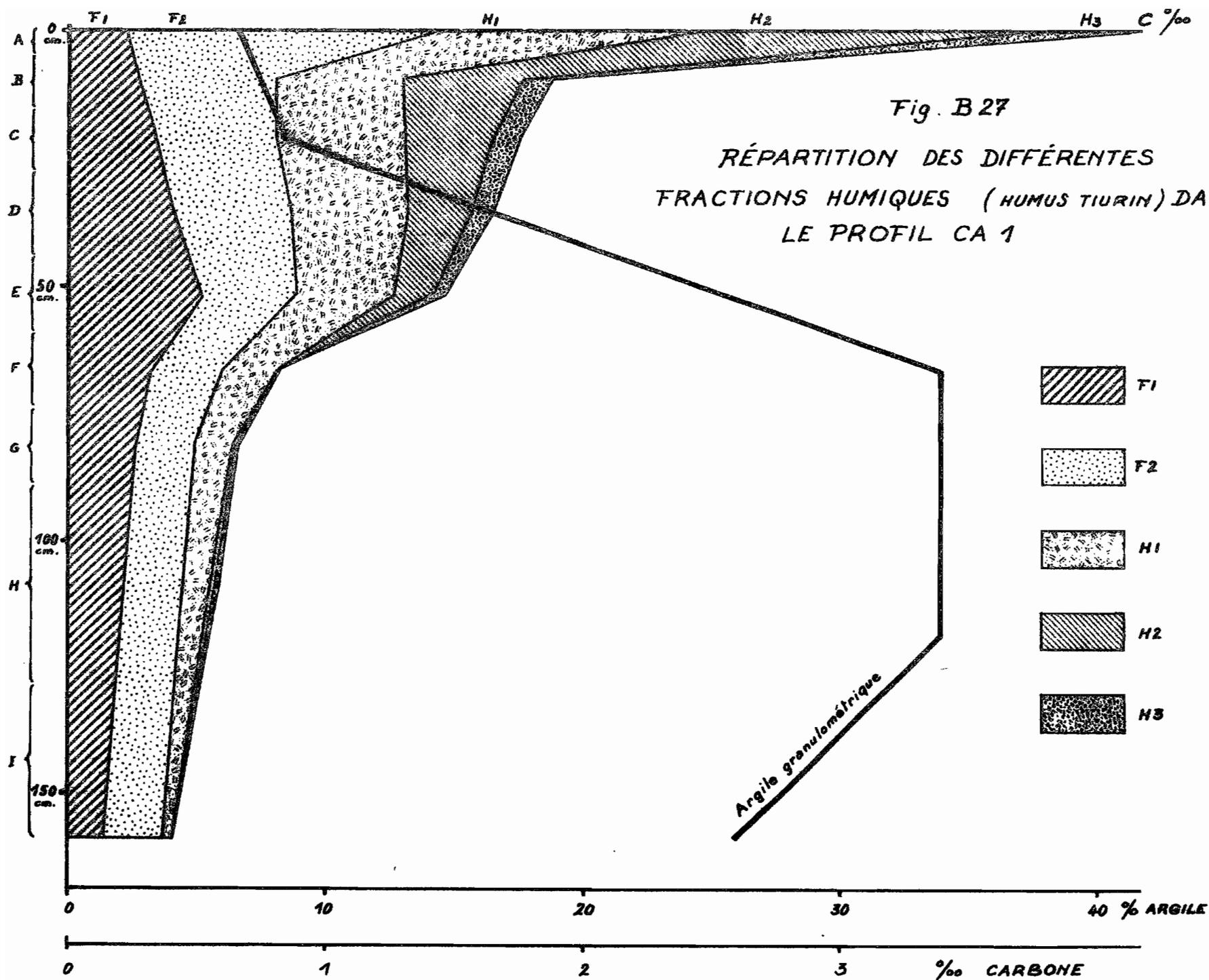
- l'horizon intermédiaire, défini plus haut, se caractérise par une répartition particulière des différentes formes. Il y a accumulation en valeur relative, mais aussi en valeur absolue, des acides fulviques, surtout de la forme F₁ représentant les acides fulviques libres. Ces derniers s'accumulent à une profondeur d'environ 50 cm. Le dosage de cette forme est très précis et les différences constatées sont donc à prendre en considération. Outre l'accumulation à 50 cm, il faut donc retenir comme un fait le minimum absolu qui apparaît dans le profil A entre 25 et 30 cm. Les acides fulviques F₂, liés aux acides humiques, restent à peu près constants dans le profil, mais leur valeur relative par rapport aux autres formes croît très progressivement vers la profondeur.

- dans les horizons profonds, les formes F₁ et F₂ sont les seules qui soient représentées. Or F₁ et F₂ sont des formes qui migrent et qui se dégradent plus ou moins rapidement.

Dans l'ensemble des horizons, on constate donc que le rapport acides humiques/acides fulviques décroît très rapidement. Ainsi pour le profil CAA il passe de la valeur de 1,9 entre 0 et 10 cm, à la valeur 0,2 à 2

Fig. B26 - RÉPARTITION DE L'HUMUS DANS LE PROFIL A
DE LA TOPOSÉQUENCE DE CASAMANCE





mètres de profondeur. Les taux d'humification, rapports entre le carbone des formes humifiées et le carbone total, sont compris entre 40 et 50 % dans les deux premiers sous-horizons. Ils descendent rapidement à moins de 25 % en profondeur, niveau où il y a cependant encore 0,3 % de matière organique totale. Enfin, la valeur du rapport C/N diminue très rapidement dès 20 cm, ce qui indique une décomposition plus forte de la matière organique et peut laisser supposer un enrichissement relatif en azote. PIAS (1968) travaillant sur les sols rouges sur grès du Tchad, obtient des résultats comparables aux nôtres et trouve également en surface, une dominance d'acides humiques.

1.2 - La mobilité des constituants organiques

La répartition relative des acides humiques et des acides fulviques a été étudiée en Afrique Occidentale par Melle THOMANN (1964). Le rôle du climat est prédominant. Mais l'étude concerne surtout les horizons les plus superficiels. Les résultats précédents indiquent qu'il y a des répartitions différentes selon l'horizon considéré, et que trois types de distribution peuvent être définis dans le cas des sols "rouges". De leur examen, il est possible d'avancer les interprétations suivantes :

- les acides humiques, relativement stables, se forment essentiellement près de la surface, et leur teneur moyenne est réglée par la biodégradation.
- les acides fulviques, plus ou moins mobiles, ont tendance à migrer dans l'ensemble du profil. Une accumulation réelle, particulièrement nette dans le profil A de la toposéquence de Casamance ("ventre" de la courbe), se confirme dans tous les autres profils étudiés, entre 30 et 55 cm de profondeur.

L'existence de ces niveaux d'accumulation est extrêmement importante, compte tenu du rôle accordé aux acides fulviques dans les phénomènes de lessivage. Ce point retiendra plus loin notre attention. Dans les profils cités, le niveau de 30 à 55 cm, correspond approximativement à la partie inférieure de l'horizon appauvri (cf. figures 26 et 27), celle où les variations de granulométrie de sables sont rapides ; ces caractéristiques

ont une grande importance pédogénétique. De plus, il ne faut pas oublier que les dosages effectués fournissent des valeurs instantanées. C'est dire que des quantités faibles d'acides fulviques en un point peuvent représenter le bilan d'équilibre d'une importation massive suivie d'une minéralisation, ou d'une biodégradation, importante. Les quantités faibles n'excluent donc pas la possibilité d'un cycle rapide de rotation des produits organiques.

Enfin, on observera que la fraction non humifiée de la matière organique, appelée humine, est constante dans tout le profil par rapport au carbone total. DUCHAUFOR et JACQUIN (1966) définissent l'humine comme une fraction de matière organique transformée par voie biochimique, et qui échappe à l'extraction au pyrophosphate. Le problème de l'interprétation des résultats de méthodes analytiques se pose à nouveau, d'autant plus que Melle THOMANN (1963) avait souligné la possibilité d'une création artificielle de certaines formes d'humus lors des extractions. C'est pourquoi la méthode TIURIN et DUCHAUFOR a été comparée à celle par électrophorèse (DABIN et Melle THOMANN, 1970). Sur les échantillons de sols rouges de Casamance, il y a de légères différences dans l'obtention du taux d'humification en fonction des méthodes. En particulier, il semble qu'une certaine proportion d'acides humiques libres, H_1 , subisse une pseudo-polymérisation qui ralentit sa migration électrophorétique. Il faut donc être prudent dans l'interprétation des formes d'humus, et utiliser différentes méthodes.

Si la mobilité dans l'espace des constituants organiques est reconnue, il faut ajouter qu'une autres mobilité existe, dans le temps, surtout quand les conditions de milieu changent. C'est ainsi que des variations importantes des teneurs en matière organique et en humus peuvent survenir quand les conditions de couvert se modifient. FAUCK, MOUREAUX et Melle THOMANN (1967) ont suivi un tel phénomène, en Casamance, sur des sols "rouges". Après le défrichage de la forêt et deux années de culture mécanisée, presque 50 % de la matière organique totale avaient disparu. Il y a donc minéralisation rapide de la matière organique et probablement un départ de quantités importantes d'acide fulviques libérés. Mais il est remarquable de noter

que les rapports acides humiques/acides fulviques n'ont pas été modifiés. Cependant, seuls les horizons les plus superficiels ont été analysés.

En considérant maintenant l'ensemble de la toposéquence de Casamance, il s'avère que les modes de répartitions des différentes formes sont les mêmes dans tous les profils. Mais deux observations importantes sont à signaler :

- la remontée progressive du niveau d'accumulation d'acides fulviques, qui, de 40 à 55 cm en haut de pente, se trouve entre 25 et 35 cm en milieu de toposéquence ;
- la légère augmentation des teneurs en acides humiques H_2 dans les profils situés en aval. On est aussitôt tenté de rapprocher cette observation de la richesse plus grande en composés H_2 des sols beiges ferrugineux tropicaux lessivés (Melle THOMANN, 1964) sols qui sur la pente font suite aux sols rouges de cette étude.

1.3 - Les conclusions

Les quantités de matière organique ne sont jamais très importantes dans les sols "rouges". Le milieu bien drainé qui est établi dans les profils explique probablement une minéralisation accélérée, et cette dernière laisse supposer un cycle de rotations rapides des composés humifiés. Des quantités importantes d'acides fulviques migrent peut-être, bien que l'analyse ne décèle qu'un bilan instantané peu élevé.

De plus, la répartition particulière de l'humus dans les 60 premiers centimètres est un fait extrêmement important. Elle suggère une mobilité réelle des acides fulviques, dont les formes sont d'ailleurs dosées jusqu'en bas des horizons B. Un tel phénomène avait été signalé dans d'autres sols ferrallitiques (SIEFFERMANN, 1969).

Le rôle de la matière organique dans la pédogénèse des sols rouges n'est pas encore établi. Mais ce rôle est peut-être essentiel, compte tenu de la mobilité certaine d'une quantité importante d'acides fulviques.

2) Le phénomène de l'appauvrissement

a) Définition

Nous avons utilisé le terme d'appauvrissement dans le cas des sols rouges sur grès (FAUCK, 1964) pour définir un fait morphologique : l'existence d'horizons supérieurs, dont les plus superficiels sont organiques, pour lesquels l'analyse révèle une richesse moins élevée en certains éléments (argile granulométrique, mais aussi fer et titane) que les horizons B, profonds, homogènes et rubéfiés qu'ils surmontent. De plus, ces horizons B ne présentent pas toujours des accumulations importantes d'argile par rapport aux roches-mères, dans la mesure où ces dernières sont bien connues. Cela veut dire que certains horizons supérieurs peuvent parfois être moins riches en argile, non seulement que les horizons B, mais aussi que les niveaux des roches-mères.

Pour dénommer ce fait morphologique, nous n'avons pas utilisé les deux autres termes courants de lessivage et d'éluviation. En effet, le mot lessivage est utilisé par les pédologues français essentiellement pour l'entraînement de l'argile et du fer (AUBERT, 1963 et 1966). BOCQUIER (1967) emploie l'expression de "lessivage en argile" dans le sens d'un déplacement vertical ou latéral de la fraction argileuse entre les horizons d'un même profil ou de plusieurs profils. D'autres auteurs ont cependant élargi le terme "lessivage" aux éléments chimiques, en précisant "lessivage mécanique" pour les particules. LENEUF (1966) en déduisait que, génétiquement, un sol ferrallitique est nécessairement lessivé. Mais le mot lixiviation a été proposé par PLAISANCE et CAILLEUX (1958) et suggéré à nouveau par AUBERT et SEGALIN (1966) pour représenter ce lessivage en bases. Nous l'employons dans ce sens. Nous utiliserons d'autre part le mot lessivage avec le sens attribué par BOCQUIER, sans préjuger du mode de transport, mais en limitant ce dernier au cas de la fraction granulométrique argileuse. Le terme éluviation a été peu employé dans les régions tropicales. A notre connaissance il l'a été surtout dans le sens d'un départ d'éléments quels qu'ils soient (argile, bases) vers d'autres horizons des profils. BOCQUIER (1967) parle plutôt d'horizons éluviaux et illuviaux créés par le lessivage. Dans ces conditions, le terme d'appauvrissement nous semble de portée plus générale, et

offre l'avantage de ne pas apporter un sens génétique précis aux phénomènes. Dans une proposition de classification des sols ferrallitiques, AUBERT et SEGALIN (1966) l'utilisent dans le sens d'une migration de l'argile et du fer avec élimination hors des profils, par opposition à lessivage, où il y aurait accumulation dans les profils de la toposéquence. ROOSE (1968 a) utilise le terme dans le sens d'une diminution d'éléments sans horizons d'accumulation différenciés. Mais les résultats que nous avons présenté jusqu'ici nous conduisent à attirer l'attention sur trois points :

- a) il est difficile de reconnaître une accumulation d'argile quand elle prend des formes diffuses comme l'enrichissement différentiel des pseudo-particules. Or, dans les sols rouges, de nombreux arguments indiquent que les horizons B sont effectivement enrichis en argile et en fer par importation dans le milieu.
- b) il est délicat de définir une accumulation quand on se souvient des divergences possibles entre les résultats analytiques, selon les méthodes employées, en particulier avec et sans déferrification.
- c) il est osé de parler de lessivage d'argile sur le simple examen des résultats de l'analyse mécanique une fois qu'on sait que l'argilification peut être partiellement due à l'intégration de quartz et d'hydroxydes de fer dans la fraction de 0 à 2 microns.

C'est pour cet ensemble de raisons que nous avons utilisé le mot appauvrissement avec un sens morphologique et analytique, sans lui donner une signification d'accumulation dans ou hors des profils, et sans lui appliquer un sens interprétatif sur les mécanismes, comme cela est plus ou moins le cas pour le mot lessivage.

Mais le fait de constater que les horizons supérieurs sont appauvris en certains constituants, s'il n'implique pas forcément de mécanisme est pour nous plus qu'une simple constatation. Il confirme que le point de départ a été différent et qu'il y a eu perte. Or, il est possible d'imaginer que des sols ont été recouverts de matériaux colluvionnaires, résultant d'un tri par le ruissellement. L'érosion a pu amener des sables, les éléments fins étant

entraînés plus loin. Les observations sur le terrain prouvent que ce phénomène existe, sauf sur les sommets de buttes où justement les sols rouges se trouvent le plus généralement. D'autre part, il peut être envisagé également que les caractéristiques anormales des horizons supérieurs sont un héritage de l'hétérogénéité des matériaux sédimentaires. Ces deux possibilités n'ont pas été perdues de vue. Mais nous avons également tenu compte de tous les résultats antérieurs. En particulier, il est maintenant établi que la morphologie des profils est la même en surface quel que soit le type de roche-mère, et quelle que soit la position topographique. Les horizons supérieurs de tous les sols ont forcément perdu une partie de leurs éléments sur une épaisseur plus ou moins grande, car les notions de recouvrement ou d'hétérogénéité des matériaux originels ne peuvent suffire pour expliquer tous les faits, surtout en haut de pente. Le mot appauvrissement représente donc une réalité pédogénétique, sans impliquer d'hypothèses sur les mécanismes de la perte. En pratique, les horizons appauvris se développent toujours sur les horizons B, qui fonctionnent comme une roche-mère particulière. Nous proposons donc la définition suivante :

- L'appauvrissement est la description d'un état de fait morphologique, mais dont l'origine est uniquement pédologique. Il est caractérisé par la perte de constituants des horizons supérieurs de certains sols, en particulier dans les régions tropicales. Cette perte semble être due à l'action de mécanismes divers. On ne peut parler d'appauvrissement que si l'on a vérifié qu'il y a perte effective, c'est-à-dire que les différences constatées ne proviennent pas de recouvrements, ou de l'héritage de roches sédimentaires hétérogènes. Dans l'état actuel des connaissances, ce terme peut représenter plusieurs mécanismes, en particulier :

- lessivage d'argile et de fer vers la base, ou hors des profils.
Ce lessivage peut être vertical ou oblique.
- lixiviation des bases et de la silice
- exportation de complexes et de chélates, en particulier de chélates liés à l'aluminium après dégradation de la kaolinite.

- érosion sélective par le ruissellement diffus, avec tri des particules suivi d'une remontée d'éléments argileux par voie biologique.

L'appauvrissement est un fait important dans les sols rouges sur grès et sa limite avec les horizons B définit un "front d'appauvrissement". Avant de rechercher les mécanismes responsables de ce phénomène, il convient, au préalable, de caractériser les diverses modifications subies par les horizons supérieurs.

2.2 - Caractérisation de l'appauvrissement

La méthode des profils latéraux nous a permis de choisir un certain nombre de couples d'échantillons, homologues sur le plan des roches-mères. Dans ces couples, l'un des termes est dans les horizons B d'un profil, l'autre se trouve dans les horizons supérieurs. La progressivité des modifications permet de penser que les transformations sont d'origine pédogénétique. Cela est surtout vrai dans les profils situés en haut de pente. Dans certains profils de mi-pente, des discontinuités apparaissent, et la probabilité de recouvrements ou de remaniements devient plus grande. C'est donc avec prudence, et en ne retenant que les profils de haut de pente, que les comparaisons ont été faites.

2.2.1 - Les variations de certains constituants

Les principales transformations subies par les horizons B devenant des horizons supérieurs, sont les suivantes :

- diminution très importante des teneurs en argile granulométrique. Dans certains cas, la variation est de 40 à 7 %, mais le plus souvent elle est de 40 à 10-15 %.
- diminution nette des teneurs pour 100 grammes de terre des éléments totaux suivants : fer, aluminium, titane, et également des formes de fer libre et de fer amorphe.
- augmentation des bases échangeables dans l'horizon le plus organique, superficiel, mais existence d'un minimum absolu de ces teneurs dans l'horizon "intermédiaire" sous-jacent.

Mises à part les bases, les variations sont dans le sens d'une diminution systématique. Mais il faut noter que des exceptions existent parfois. Elles se limitent cependant aux cas suivants :

- augmentation légère en valeur absolue des teneurs du fer amorphe dans l'horizon le plus superficiel, ce qui se traduit par un minimum très accusé dans l'horizon "intermédiaire". Mais, de toute façon, il y a diminution par rapport aux taux dans les horizons B.
- augmentation des quantités de sables très fins, dans certains cas, des sables grossiers, plus rarement.

Les transformations précédentes sont spécifiques des horizons appauvris. Mais il faut rappeler que d'autres transformations décelées précédemment en profondeur se poursuivent dans les horizons supérieurs :

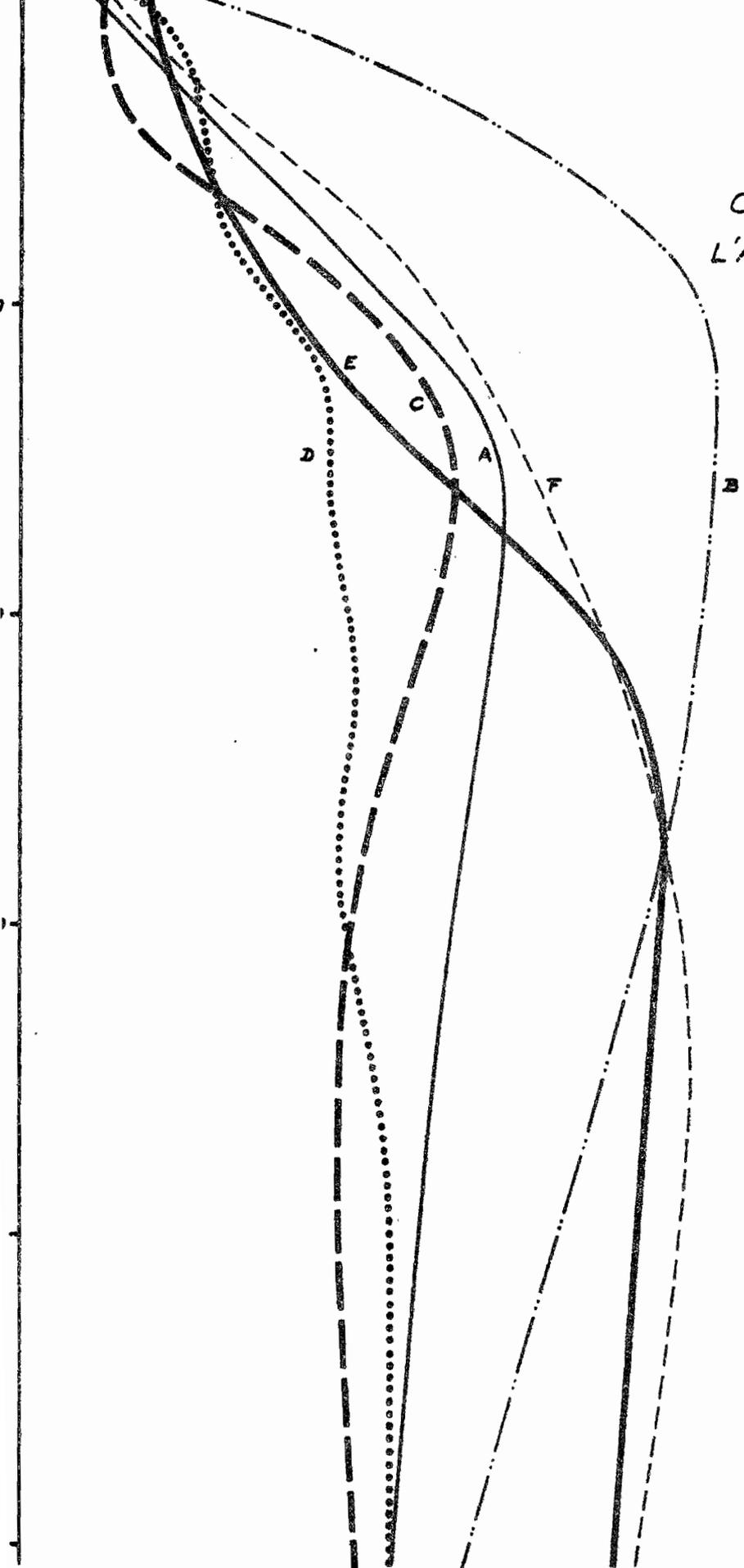
- diminution de la taille des sables dans toutes les classes granulométriques.
- enrichissement en quartz et surtout en hydroxydes de la fraction granulométrique argileuse.

Le fait "appauvrissement" consiste donc d'abord en une perte relative de certains constituants. Cette perte se répercute sur une profondeur importante, variant, selon les profils, entre 50 et 80 cm et même 100 cm. La figure B 28 présente un certain nombre de courbes de répartition de l'argile granulométrique. On y observe des formes assez variées. Mais les épaisseurs appauvries ainsi déduites des analyses granulométriques, ne correspondent pas toujours à celles déterminées par les descriptions de la texture effectuées sur le terrain. La présence de pseudo-particules est l'explication la plus valable, puisque leur présence tend à donner une sensation de texture sableuse, alors que ces agrégats peuvent être détruits par l'analyse mécanique. En effet, dans les horizons les plus superficiels, les analyses avec et sans déferrification ont fourni presque toujours les mêmes chiffres. On peut en déduire, soit que les pseudo-particules se détruisent, soit qu'ils perdent une partie de leur stabilité dans les horizons supérieurs. Ce point méritait d'être approfondi.

0 10 20 30 40 50 % argile granulométrique

Fig. B 28

COURBES DE RÉPARTITION DE
L'ARGILE DANS LES HORIZONS
SUPÉRIEURS



- A — Profil HLA 41
DAHOMÉY
- B — Profil HF 32
HAUTE-VOLTA
- C — Profil CA1 Sêfo
Casamance, SÉNÉGAL
- D — Profil PS 46
Besse-Casamance
- E — Profil CA 50 Sêfo
Casamance
- F — Profil HLA 49
DAHOMÉY

2.2.2 - L'horizon dit "de comportement"

CHAUVEL et FAUCK (1969) ont étudié la granulométrie des horizons supérieurs d'un profil à épaisseur appauvrie faible. Ils ont pratiqué la méthode DEMOLON et BASTISSE (1935) avec utilisation dans un cas d'eau oxygénée technique, dans un autre d'eau oxygénée "électro". Une déferrification méthode JEFFRIES (1941), a également été effectuée. Les résultats obtenus sont divergents et ils ont alors été comparés à ceux d'une détermination des teneurs en kaolinite par l'analyse thermopondérale. Dans l'exemple étudié, il est apparu que l'horizon compris entre 35 et 90 cm se différenciait, non seulement des horizons supérieurs, nettement moins argileux et moins riches en kaolinite, mais aussi des horizons sous-jacents qui paraissaient sur le terrain légèrement plus sableux. Cet horizon n'est pas un horizon d'accumulation d'argile, comme l'observation de terrain le faisait supposer. Mais il est caractérisé par une dispersabilité plus grande des colloïdes, c'est-à-dire par une diminution de la stabilité des pseudo-particules. C'est son comportement vis à vis des techniques analytiques qui l'individualise.

Les auteurs ont appelé "horizon de comportement" ce niveau, qui est le premier stade de la transformation des horizons B en horizons appauvris. La diminution de stabilité des pseudo-sables a été vérifiée sur la plupart des profils. Ensuite, dans l'horizon superficiel, il semble que ces pseudo-particules perdent pratiquement toute leur stabilité.

Des observations similaires ont été faites par DE BOISSEZON (1965) qui a décrit un horizon à plus forte compacité sans être plus riche en argile que les horizons voisins. Cet horizon correspond à la limite du dessèchement des sols de savane tropicale. AUDRY et POISOT (1966) notent également l'inexistence des pseudo-sables dans les 37 premiers cm d'un sol rouge sur grès du Tchad, et la présence d'un maximum de consistance entre 24 et 37 cm, à la base des horizons humifères. AUDRY et POISOT

émettent l'idée qu'il s'agit du premier stade de dégradation des sols vers le type ferrugineux tropical. Ils considèrent qu'il s'agit d'un faciès de savane.

Les phénomènes d'appauvrissement sont donc associés à la diminution de stabilité des pseudo-particules. Or, précédemment, dans le cas de la toposéquence de Casamance, nous avons conclu à une accélération brusque des phénomènes de morcellement des sables à une profondeur comprise entre 50 et 80 cm. Nous avons noté que les sables de taille comprise entre 50 et 100 microns diminuaient nettement en quantité, ce qui avait pour conséquence une augmentation relative de la fraction des sables moyens. Il est alors remarquable de retrouver à un niveau situé à une profondeur moyenne de 40 à 50 cm toute une série de phénomènes tels que variations de granulométrie des sables, augmentation nette du gradient d'appauvrissement en argile, accumulation d'acides fulviques, enfin dégradation des pseudo-particules. Il y a peu de chance pour que tous ces phénomènes soient réellement indépendants.

2.2.3 - Les variations en valeur relative

Les diminutions constatées dans les horizons appauvris n'affectent pas de la même façon tous les constituants. Pour mettre en évidence des différences de comportement nous avons étudié l'évolution des rapports suivants : fer/argile, fer/aluminium, fer/titane et aluminium/titane.

En règle générale, il y a une nette augmentation du rapport fer/argile et fer/aluminium dans les horizons les plus riches en matière organique. Des exceptions existent, par exemple le profil CAA de Ziguinchor (tableau n° B 15-p. 216, ch. V.), dans lequel les rapports sont sensiblement les mêmes. Mais le plus généralement les rapports fer/argile dans les dix premiers cm dépassent 16 % alors qu'ils sont de 8 à 12 % dans les horizons B. Le fer libre y atteint de son côté 11 à 14 % du poids d'argile granulométrique, cela sans apparition de concrétionnement ou de taches ferrugineuses.

Les appauvrissements en fer sont importants puisque les teneurs dans le profil A de Séfa ne sont plus que de 1,2 % au lieu de 5,0 % à deux mètres, mais ils sont relativement moins accentués que ceux en argile, ou en alumine totale. La répartition des formes d'hydroxydes de fer varie également, mais les rapports fer libre/fer triacide et fer amorphe/fer libre présentent des variations assez irrégulières et peu interprétables. Cependant, dans plusieurs profils, on note un minimum relatif du fer amorphe et du rapport Fe/Al à une profondeur variant de 30 à 60 cm. Ce résultat n'a pu être généralisé faute d'un nombre suffisant d'analyses sur des prélèvements très resserrés dans les horizons supérieurs.

Les rapports fer/titane et aluminium/titane décroissent toujours dans les horizons supérieurs. Comme la diminution des teneurs en titane par unité de poids est souvent faible, nous avons songé à prendre le titane comme invariant relatif. Cela amène presque toujours à la conclusion d'un départ relatif d'alumine et de fer, quel que soit le sort du titane. Par exemple, dans la toposéquence de Casamance le rapport Fe/Ti décroît de 4,0 à 3,2 en remontant des horizons B vers la surface. Le rapport Al/Ti qui variait de 12,5 à 15,0 en B, décroît jusque 7,6. Les diminutions des teneurs par unité de poids sont donc de plus en plus importantes selon les éléments successifs, titane, fer, aluminium.

2.3 - Conclusions

L'appauvrissement se traduit par une augmentation importante en valeur relative des teneurs en quartz. Les apports de silice par les graminées, qui en contiennent de 1 à 4 % de leur poids sec (D'HOORE, 1954), ne peuvent expliquer une telle augmentation. Les effets de l'érosion, auxquels on songe en premier lieu fournissent une explication qui rend mal compte des différences de comportement entre le fer, l'aluminium et le titane. Par contre, la diminution de stabilité des pseudo-particules et la présence de l'horizon dit de comportement apportent des arguments pour envisager la mise en oeuvre de mécanismes pédogénétiques.

En éliminant les recouvrements et les cas d'hétérogénéité héritée des sédiments, ces mécanismes peuvent être les suivants :

- érosion sélective en surface par le ruissellement, avec un tri entre les éléments en fonction de leur granulométrie. Elle suppose un transfert progressif vers le bas de l'appauvrissement superficiel. Les actions biologiques (vers, termites) peuvent en être la cause.
- lessivage ou entraînement vers la profondeur, soit verticalement, soit obliquement, de certains éléments. Ce départ peut se concevoir soit sous forme de particules, soit sous forme de composés pseudo-solubles, de complexes, ou de chélates.

Mais quels que soient les mécanismes en action, trois facteurs essentiels conditionnent leur développement. Ce sont :

- a) la matière organique : il n'y a en effet pas de phénomènes d'appauvrissement sans présence de matière organique.
- b) le facteur biologique : il conditionne d'une part, la biodégradation des produits organiques, d'autre part, le transfert probable en profondeur de l'appauvrissement.
- c) la circulation de l'eau : elle est essentielle. En surface le ruissellement entraîne des particules, c'est l'érosion. Dans les profils l'eau qui percole provoque le lessivage et les entraînements divers.

Nous allons successivement examiner ces trois facteurs, ainsi que les mécanismes possibles de leur action. Nous tiendrons compte des données fournies par la bibliographie et des divers résultats obtenus, avant de proposer une interprétation pour le phénomène d'appauvrissement.

B - LES FACTEURS ET LES MECANISMES DE L'APPAUVRISSMENT

Nous envisagerons successivement le rôle de la matière organique, des activités biologiques, enfin de l'eau et de sa circulation.

1) La matière organique et ses produits de transformation

Nous avons vu que des variations rapides des teneurs en matière organique pouvaient survenir, en relation avec un changement de couverture végétale. AUBERT (1959) a d'ailleurs insisté sur ce point, et NYE et GREENLAND (1964) ont donné des précisions sur les conséquences pédologiques de ce phénomène. Or, le rôle de la matière organique dans la pédogénèse, en particulier dans le lessivage, a été souligné par de nombreux auteurs. C'est pourquoi un rappel bibliographique, limité aux publications les plus récentes, s'impose pour justifier certaines des interprétations ultérieures. Les travaux ont porté sur les liaisons de la matière organique avec les argiles, avec l'aluminium, avec la silice, et également sur le rôle de l'humus dans la dégradation de la kaolinite.

1.1 - Données bibliographiques

a) références sur les liaisons entre les composés organiques et les argiles.

DOMMERCUES et DUCHAUFOR (1965), DOMMERCUES (1969) enfin DOMMERCUES et MANGENOT (1969) étudient la biodégradation des complexes argilo-humiques en régions tropicales. KELLERMAN et TSYURUPA (1966) discutent du rôle du fer et de la matière organique dans l'aggrégation des argiles. DABIN (1967) décrit la stabilisation de la dégradation des matières organiques par les éléments fins du sol. Cette question est reprise par KYUMA, HUSSAIN, et KAWAGUCHI (1969) qui soulignent la meilleure humification des fractions grossières du complexe argilo-humique. Enfin SOUCHIER et DUCHAUFOR (1969) notent l'augmentation de dispersabilité des argiles en présence de matière organique.

Les liaisons stables de la matière organique et de l'argile sont donc un fait admis depuis très longtemps. Pourtant, la notion de dispersabilité de l'argile en présence de certains constituants organiques est une donnée intéressante à retenir.

b) références sur le rôle de la matière organique dans la mobilité de certains constituants.

SCHATZ, CHERONIS et SCHATZ (1954) précisent l'importance de la chélation dans la pédogénèse. LOSSAINT (1956 et 1959) réalise la solubilisation des oxydes de fer par des extraits de litières. Mme TITOVA (1962) étudie les complexes acides fulviques-fer. Elle conclut qu'un gramme de carbone des acides fulviques peut fixer, et donc transporter, de 670 à 760 mg de Fe_2O_3 . DUCHAUFOR et DOMMERGUES (1963) insistent sur l'importance du fer et de l'alumine liés aux constituants organiques mobiles et DUCHAUFOR (1968) reprend ce point en généralisant le rôle de la matière organique dans la dynamique des profils. DUCHAUFOR (1963) puis KOVALEV et GENERALOVA (1967) considèrent que les acides fulviques représentent la forme essentielle de mobilité du fer. DUCHAUFOR (1965) pense que les oxydes de fer serviraient de liaison entre les charges négatives des argiles et les charges négatives des groupements COO-ad de l'humus. LEVASHKEVICH (1966) étudie l'adsorption des acides humiques sur les hydroxydes de fer et d'aluminium et précise que ces derniers acquièrent une capacité d'adsorption supérieure. SCHWERTMANN (1966) conclut à l'effet inhibiteur de la matière organique sur la cristallisation du fer amorphe. DUCHAUFOR (1967) souligne la stabilité de la complexation à l'état anionique sous la forme Fe^{+++} et Al^{+++} , ce qui permet de résister aux modifications de pH rencontrées au cours des migrations. Il note que l'aluminium serait entraîné plus loin que le fer en milieu oxydant. SCHWERTMANN, FISCHER et PAPENDORF (1968) insistent sur l'inhibition de la cristallisation des gels amorphes de fer en présence de composés organiques. MC KEAGNE et ARNAUD (1969) observent que les revêtements argileux issus du lessivage sont généralement enrichis en matière organique. DABIN et Melle THOMANN (1970) déclarent que le fer entrave les liaisons humus/matière minérale. Enfin SCHNITZER et DESJARDINS (1969) pensent qu'il y a une interaction entre les substances humiques et la silice qui migrent dans les lysimètres.

De ces différents travaux, en particulier de ceux de l'école de Nancy, nous retiendrons surtout la mobilité possible de certains constituants, argile, hydroxydes, en présence des acides fulviques. Nous retiendrons également l'idée que la matière organique peut stabiliser le fer à l'état amorphe.

c) Données sur le rôle de la matière organique dans la dégradation de la kaolinite.

KAKONOVA, ALEKSANDROVA et KONOTITOVA (1964) soulignent l'importance des acides organiques ayant des groupes OH et COOH en position ortho dans la décomposition des minéraux, dont la kaolinite. DUCHAUFOUR et LELONG (1967) concluent à la réalité, et à l'importance, de la dégradation de la kaolinite en milieu ferrallitique sous l'influence de la matière organique très acide émanant des litières. LELONG (1967 et 1968) donne à cette dégradation de la kaolinite un rôle très important dans le processus d'appauvrissement de certains sols ferrallitiques. Une conception comparable avait amené RIQUIER (1965), puis DUCHAUFOUR (1967), à prononcer le mot de podzolisation, dans le cas de certains sols ferrallitiques. PIAS (1968), pour des sols rouges sur grès, LAMOUREUX, PAQUET, PINTA et MILLOT (1968) pour des sols méditerranéens, admettent également la dégradation de la kaolinite en présence de matière organique. Enfin SIEFFERMANN (1969) précise la nécessité de cette dernière pour une production de composés amorphes à partir de constituants cristallisés.

1.2 - Rôles de la matière organique

Tous ces travaux permettent de considérer comme possible, dans le cas des sols rouges sur grès, l'entraînement de la kaolinite, du fer et de l'aluminium par les constituants organiques. Or, dans le cas des sols rouges, l'appauvrissement en argile et en hydroxydes est strictement associé à deux autres phénomènes : le premier est la présence d'acides fulviques, dont une partie migre vers la profondeur ; le second est l'augmentation de dispersabilité de l'argile des pseudo-particules, au niveau de l'horizon "de comportement". Il est donc probable que les acides fulviques

jouent un rôle important dans le phénomène d'appauvrissement. Ce rôle est déduit de nombreuses observations. Mais ces dernières ne permettent pas de préciser si la kaolinite est lessivée à l'état de particules, ou s'il y a entraînement de l'aluminium libéré après dégradation de la kaolinite.

Enfin, il faut retenir le rôle éventuel des constituants organiques dans la création des amorphes à partir des hydroxydes cristallisés et dans leur concentration ultérieure dans les horizons B.

2) Le facteur biologique

Les principaux aspects de l'activité biologique se rapportant à l'appauvrissement concernent d'une part la macrofaune, d'autre part la microfaune.

2.1 - Le rôle de la faune du sol

SYS (1955) a souligné l'importance des termites dans la formation des latosols, ou sols ferrallitiques. LEVEQUE porte actuellement son attention sur ce point au Togo. Précédemment, en première partie, nous avons décrit les "turricules" de terre remontés par les vers à la surface de certains sols rouges du Dahomey. Les quantités d'argile et de limon ramenées en surface chaque année sont importantes. L'idée que de telles remontées puissent expliquer l'appauvrissement des sols ferrallitiques a été suggérée par ROOSE (1968 a). Cet auteur considère que les termites et les vers peuvent ramener en surface du sol des quantités de matière suffisantes pour transmettre en profondeur les appauvrissements superficiels par érosion.

Les observations effectuées sur les sols rouges du Sénégal et de Haute-Volta ne nous permettent pas d'être aussi affirmatifs. Les termitières érigées sont souvent rares, et les turricules de vers sont absents sous la végétation de savane. S'il est probable que les actions de la faune sont importantes, il ne semble pas qu'elles puissent expliquer des profondeurs d'appauvrissement importantes, comme celles souvent observées.

2.2 - Le rôle des microorganismes

DOMMERCUES et MANGENOT (1969) ont fait le bilan des activités biologiques dans les sols. Si ces activités sont multiples ARISTOVSKAYA, DARAGAN, SYKINA et KUTUZOVA (1969) insistent surtout sur le rôle des microorganismes dans la mise en mouvement de certains constituants des sols.

En effet, les activités microbiennes règlent les phénomènes suivants :

- décomposition de la matière organique, en particulier des litières, et création d'acides fulviques et de chélates, c'est-à-dire de produits susceptibles de complexer certains éléments et de les entraîner en pseudo-solution.
- transformation, dans certaines conditions, du fer ferrique en fer ferreux susceptible de se déplacer en solution.
- biodégradation des complexes et des chélates qui ont migré, ce qui se traduit par une brusque immobilisation de certains éléments.
- modifications des concentrations de la solution du sol au niveau de la rhizosphère.

Dans le cas des sols rouges, le rôle des microorganismes est incontestablement déterminant dans le développement des phénomènes liés à l'appauvrissement. Mais il n'est pas assez bien défini pour séparer ce qui revient à la biodégradation ou à la minéralisation dans l'évolution de la matière organique et des complexes pseudo-solubles.

3) L'eau et sa circulation

Deux aspects de la dynamique de l'eau sont à séparer, le ruissellement à la surface du sol, la percolation dans le profil.

3.1 - Le ruissellement

Le rôle du ruissellement dans l'entraînement de particules a été mis en évidence en Casamance. A Séfa, le défrichement précédant la mise en culture mécanisée des sols "rouges" a été suivi par une érosion importante, en nappe et par ravinement. Des quantités de terre atteignant en moyenne neuf tonnes/hectare/an ont été transportées dans les cuves expérimentales de mesure de l'érosion. Le découpage théorique moyen est de 0,6 mm par an (FAUCK, 1954, COINTEPAS, 1956, ROOSE, 1965, FAUCK, MOUREAUX et Melle THOMANN, 1969). Mais la terre entraînée avait été triée. Elle comportait essentiellement de l'argile et du limon, et ces fractions étaient exceptionnellement riches en éléments échangeables.

Le cas de Séfa est un peu exceptionnel, et en pratique l'évolution peut se faire de deux façons. D'une part, il y a le décapage par l'érosion dite "accélérée", en rapport avec un brusque changement des conditions de milieu, surtout de la couverture végétale. D'autre part, il y a l'entraînement sélectif de terre par l'érosion dite "normale", en nappe. Cette érosion sélective est peu intense, mais elle est de longue durée. Elle entraîne les particules d'argile et de limon, et elle laisse en place les sables. Elle transporte essentiellement les particules fines, donc celles qui ont été libérées des pseudo-sables. C'est pourquoi le phénomène de dégradation de la stabilité des pseudo-particules apparaît comme la première étape, nécessaire, du phénomène d'appauvrissement.

La dégradation des pseudo-particules peut être due à deux causes :

- soit à une augmentation de la dispersabilité des ciments. Le mécanisme serait en rapport avec l'évolution des constituants organiques.
- soit à une dégradation mécanique des agrégats par action du ruissellement.

En pratique donc, les entraînements par érosion amènent toujours une augmentation relative sur place des sables fins et grossiers. Des entraînements de sables à faible distance ne sont pas exclus. Dans le cas

des sols rouges, et tant que l'érosion est "normale", les observations faites nous font penser que ce phénomène est peu important. Ces sables ne sont plus protégés par une texture à pseudo-particules. Ils sont donc susceptibles d'une nouvelle fragmentation, et c'est en effet ce que l'on observe dans les horizons supérieurs.

Mais l'appauvrissement par érosion ne se réalise pleinement qu'en surface. ROOSE (1968 a) considère que cet appauvrissement est ensuite transmis en profondeur par des facteurs d'homogénéisation d'origine biologique. Nous avons déjà émis des réserves sur ce point, mais de toute façon, l'érosion sélective doit être considérée comme un des mécanismes de l'appauvrissement. Cependant, elle n'explique pas de façon satisfaisante les différences constatées entre les pertes d'argile, celles des différentes formes de fer et celles de titane. Cela nous a conduit à effectuer diverses évaluations. En particulier, nous avons pris comme hypothèse une diminution du titane dans les horizons supérieurs due uniquement à l'érosion, et non au lessivage. En en déduisant l'argile entraînée, calculée à partir du rapport fixe Ti/argile qui existe dans les horizons B, il est possible d'établir une évaluation approximative des pertes. Dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire lorsque l'appauvrissement en argile et en titane est très élevé (prélèvement CA 411), on trouve que 80 % de l'argile ont été enlevés par le ruissellement.

Cela signifie aussi que 20 % de l'argile ont été soumis au lessivage. Mais l'exemple précédent n'est pas généralisable. Les pertes de Ti dans les horizons supérieurs sont rarement aussi élevées. De plus, on verra plus loin, que du titane peut être effectivement entraîné par le lessivage. Malgré ces réserves, il est possible de conclure à la réalité d'une perte continue d'argile en surface par le ruissellement diffus. L'importance réelle de ce mécanisme doit dépendre de la position dans la toposéquence, des caractéristiques de la couverture végétale, et surtout des facteurs climatiques et microclimatiques.

3.2 - La percolation

La percolation de l'eau dans les horizons supérieurs permet le lessivage. De nombreux auteurs ont abordé ce point. Nous ne citerons que ceux dont les conclusions se rapportent particulièrement au sujet traité.

a) Relation entre le drainage et le lessivage.

AUBERT et HENIN (1945) ont mis l'accent sur le drainage comme facteur de pédogénèse. CORRENS (1961) précise expérimentalement que le lessivage de la kaolinite affecte des particules de taille inférieure à un micron. HALLSWORTH (1965) déclare que le transport d'argile s'arrêterait quand le taux moyen d'argile atteint un certain niveau, qui serait de l'ordre de 40 % pour la kaolinite. AUDRY (1967) explique que les possibilités potentielles théoriques de lessivage décroissent de la surface vers la profondeur. D'autre part, les possibilités réelles sont sous la dépendance des conditions physico-chimiques des horizons traversés. BONFILS, CHARREAU et MARA (1963), puis récemment CHARREAU et CHAUVEL (1969) constatent des entraînements d'éléments fins dans les eaux de drainage des sols sableux appelés "DIOR" au Sénégal et des sols rouges sablo-argileux dit de "BOULEL". Les quantités entraînées sont faibles, mais la répétition chaque année du phénomène peut conduire à des quantités exportées importantes. C'est ROOSE (1967 a et b) qui s'attache à vérifier la réalité du lessivage dans des sols ferrallitiques, en particulier dans des sols jaunes sur sables tertiaires. ROOSE a pu constater, et chiffrer, un entraînement d'argile par les eaux de percolation. Les quantités sont faibles, et il s'agirait surtout d'un lessivage vertical. Compte tenu de la non observation d'un horizon d'accumulation, ROOSE (1968 a et 1968 b) pense que ces éléments argileux migrent jusqu'à la nappe et jusqu'au réseau hydrographique. Des pertes de silice soluble et de bases accompagnent celles d'argile, alors que les transports de fer sont assez faibles (ROOSE et BIROT, 1970).

b) relations entre le drainage et la dégradation de la kaolinite.

Outre les auteurs qui ont insisté sur une dégradation de la kaolinite par les produits organiques, ou sur une désilicification par action de la végétation (D'HOORE, 1954), il faut signaler ceux qui ont envisagé ce phénomène sous l'action des solutions, sans parfois préciser le mécanisme plus avant. SEGALEN (1957) admet qu'avec des pluviométries supérieures à 1.500 mm la kaolinite a tendance à se désilicifier. MAIGNIEN (1958), LENEUF (1966), admettent la rupture des feuillets lorsque les conditions de drainage s'améliorent. MILLOT (1964) attire l'attention sur le fait que la kaolinite, minéral résistant, peut se désilicifier en présence de solutions très désaturées en silice. LAFOND (1965) admet que la kaolinite se désorganise vers les sommets des profils et que la stabilité de ce minéral est un phénomène statistique. DELVIGNE (1965) et PIAS (1968) considèrent que la dégradation est réelle dans les régions tropicales. Enfin MARTIN D. (1967) conclut à la destruction d'argile par hydromorphie dans les horizons supérieurs de certains sols tropicaux.

L'étude au laboratoire de ce phénomène est amorcée par GASTUCHE, DELVIGNE et FRIPIAT (1954). GASTUCHE (1959), étudie l'altération par des agents chimiques. PEDRO et BERRIERE (1966) vérifient que la kaolinite soumise à la simple action d'un courant d'eau à 65° perd de la silice qui passe en solution et se transforme en boehmite. Au microscope, ils observent une modification de la disposition des feuillets. MILLER (1967) précise que l'attaque acide de la kaolinite se manifeste essentiellement sur les bords des feuillets. Plus récemment BRINKMAN (1969-1970) envisage un processus de ferrolyse pour la destruction des argiles, avec déplacement du fer échangeable par les ions H^+ , ce qui se traduit par un phénomène de corrosion. Enfin rappelons que MILLOT et FAUCK (1970) ont précisé les conditions thermodynamiques de la désilicification de la kaolinite.

c) les possibilités de lessivage dans les horizons supérieurs des sols rouges.

Précédemment, nous avons obtenu les résultats suivants :

- la pénétration de l'eau dans les sols "rouges" est caractérisée par la constance de la perméabilité dans le temps,
- l'eau de pluie qui percole dans les profils en hivernage se charge progressivement en silice solubilisée à partir des quartz. Mais dans les horizons supérieurs, l'eau libre qui circule dans les macropores contient sûrement moins de 1 ppm de silice. Dans ces conditions elle peut provoquer la désilicification de la kaolinite. Cependant ce phénomène sera ralenti par la présence de quantités importantes de quartz, source prioritaire de silice sur le plan de la thermodynamique. De nombreux résultats, dont ceux sur l'argilification des pseudo-particules, nous permettent donc d'envisager un entraînement important des argiles par lessivage oblique et vertical. Les recherches de ROOSE, menées dans des sols sur grès, justifient nos conclusions.

Des arguments existent également pour envisager une dégradation de la kaolinite, dégradation limitée, vue la richesse en quartz des horizons supérieurs : mais plausible compte tenu de la présence de faibles quantités d'alumine libre.

Cependant, il n'est pas possible de préciser l'importance du phénomène de lessivage, ni le mode d'entraînement des constituants. Ces derniers peuvent être soit des particules, soit des complexes ou des chélates. Pour pousser plus loin les interprétations, il est donc nécessaire de mettre en évidence les phénomènes, et non plus seulement de les déduire des observations ou des analyses. La seule solution nous a paru être la réalisation de manipulations de laboratoire.

C - MISE EN EVIDENCE DE CERTAINS MECANISMES

Deux problèmes n'ont pas été résolus jusqu'à présent. L'un concerne le rôle éventuel de la dégradation de la kaolinite dans l'appauvrissement des horizons supérieurs ; l'autre se rapporte aux constituants qui migrent effectivement par lessivage. Ces deux problèmes seront examinés successivement.

1) La dégradation de la kaolinite

Au chapitre VI, nous avons indiqué une individualisation de quantités très faibles d'alumine, dite amorphe, sur toute l'épaisseur des profils. Les quantités dépassent rarement 1 % et ce taux peut être rapproché de la valeur de 1,9 des rapports SiO_2/Al_2O_3 qui indique la présence d'un peu d'alumine non combinée. Cette dernière ne peut provenir que de la dégradation de la kaolinite, puisque les minéraux en voie d'altération sont pratiquement inexistantes. Les quantités sont faibles et les pertes probables par lessivage le sont également. Pourtant, des exportations peu élevées d'alumine peuvent avoir une importance non négligeable. Le calcul montre qu'un départ de 6 % de l'alumine présente dans un horizon correspond à une diminution de 14,3 % de kaolinite. Si la silice reste en place, un horizon de composition suivante : 65 % quartz, 31,8 % d'argile, 2,5 % fer, 0,7 % de titane, devient par le seul départ de 6 % d'alumine : 79 % quartz, 17 % d'argile, 2,7 % de fer, 0,8 % de titane. L'appauvrissement de 31,8 à 17 % d'argile serait dû à l'entraînement de seulement 6 % d'alumine chélatée. Le calcul précédent montre l'importance que peuvent avoir, dans l'appauvrissement, des départs relativement faibles d'alumine. Pour cette raison nous avons essayé de vérifier la dégradation de la kaolinite, déduite jusqu'à présent d'analyses chimiques.

La recherche de boehmite a été négative, celle de gibbsite également. Si de l'alumine a été extraite des structures argileuses, elle est donc restée à l'état amorphe. Les examens au microscope électronique ont été également décevants : les cristaux de kaolinite ont une forme hexagonale parfaite. Il n'y a pas de minéraux abimés dont la présence pourrait

faire penser à une dégradation. Nous pensons que cela n'exclut pas la pulvérisation de la kaolinite avec libération des ions Si et Al, sans présenter de stades intermédiaires. Cependant l'hypothèse d'une fragmentation et d'une diminution progressive de taille de la kaolinite dans les horizons supérieurs n'a pas pu être vérifiée.

En définitive, de nombreuses observations indiquent qu'il y a de l'alumine libre, et donc qu'une faible quantité de kaolinite se dégrade. Mais il ne semble pas que ce phénomène prenne beaucoup d'importance dans le cas des sols "rouges". Pour que la dégradation de la kaolinite devienne un fait pédogénétique essentiel, il faut que les conditions suivantes s'établissent :

- augmentation de la pluviométrie, ce qui peut abaisser en dessous de un ppm la teneur en silice des solutions.
- diminution des teneurs en quartz des sols en dessous d'un certain seuil.
- éventuellement, augmentation du rapport acides fulviques/acides humiques.

2) La migration de certains constituants

Nous avons essayé de mettre en évidence les migrations dans les sols à l'aide de manipulations de laboratoire. Nous nous sommes inspirés des recherches de BETREMIEUX (1951) et de la méthode mise au point par PEDRO (1964). Mais nos techniques ont été très simples. Les échantillons de terre sont ceux prélevés sur le terrain, sans aucune préparation, ni tamisage. Dans toutes les expériences il n'y a pas de litière, car celle-ci n'existait pas dans le cas des prélèvements de surface.

2.1 - Les manipulations

a) La percolation continue en circuit fermé.

La méthode consiste à évaporer l'eau qui a percolé sur un échantillon, et à la faire circuler à nouveau en circuit fermé. L'inconvénient qui est apparu est la concentration progressive de certains constituants dans le percolat, et leur destruction possible par ébullition.

La percolation continue en circuit fermé a été réalisée sur des échantillons d'horizons B provenant de Casamance (CA 505 - CA 507 - 7 F - RF 3 - CA 14), de Haute-Volta (HF 394), et du Dahomey (HLA 495), et sur deux horizons de surface du Sénégal et de Haute-Volta (CAA et HF 391). La durée des percolations a été variable, atteignant au maximum 500 heures. Les quantités d'eau percolée à travers les échantillons représentent l'équivalent de chutes de pluies dont le total varie suivant les cas de 3 à 10 mètres.

b) la percolation discontinue en circuit ouvert.

La percolation discontinue en circuit ouvert consiste à faire filtrer, de façon intermittente, de grandes quantités d'eaux à travers des échantillons à drainage libre, sans atteindre un stade où des phénomènes d'engorgement puissent se produire. Le produit percolé ne subit pas d'ébullition et seule une concentration sous vide est réalisée, suivie d'une dernière opération de centrifugation réfrigérée. Cette deuxième méthode a été utilisée uniquement sur des prélèvements organiques, car la percolation d'eau se rapprochait des conditions naturelles en surface des sols, sans addition de produits organiques divers ou surtout de litière. De plus, elle pouvait également représenter l'équivalent d'un "lessivage" du sol par des acides organiques libérés en haut d'allonge. La percolation en circuit ouvert a été effectuée uniquement sur des échantillons de surface des profils de la toposéquence de Casamance (CA 411 et CA 491). Une bourre de coton épaisse a été placée sous le sol pour être sûr qu'il n'y ait pas d'entraînements mécaniques en bas d'allonge. Ce procédé a limité la portée des conclusions possibles sur les dépôts de silice, malgré l'utilisation d'un témoin sans sol.

2.2 - Les résultats

2.2.1 - La percolation continue sur des horizons B

La percolation continue, pendant de très nombreuses heures, sur des horizons B argileux, a entraîné des quantités extrêmement

faibles de produits solides. Seuls des composés solubles étaient dosables, essentiellement des bases et de la silice. Aucune conclusion ne peut être tirée des quantités de silice entraînée car une partie peut provenir des filtres installés sous les échantillons. Un témoin a bien été utilisé pour permettre d'évaluer ces dernières quantités, mais les différences obtenues ne sont pas significatives. Les quantités de silice entraînées sont probablement faibles. Par contre, les bases lixiviées, surtout du Ca et du Mg, sont élevées, et le pH des percolats dépasse souvent 7,0. La percolation d'eau dans le sol tend donc à désaturer les horizons B. Ce résultat concorde avec la définition des trois stades de désaturation retenus dans la classification des sols ferrallitiques. Ces stades sont grossièrement en relation avec le total pluviométrique. (AUBERT et SEGALIN, 1966). En fait, un équilibre s'instaure entre les apports en surface par la végétation et la lixiviation des bases, équilibre qui dépend surtout du climat et de la richesse en éléments colloïdaux. Il y a un cycle continu, qui est dirigé par la production annuelle de matière végétales (DOMMERGUES, 1963). Dans les horizons organiques, les teneurs en éléments échangeables sont importantes, mais dans tout le reste des profils les quantités sont faibles et uniformément réparties.

En conclusion, les percolations effectuées sur des horizons B ont eu une action très limitée. Les horizons rubéfiés sont donc très stables et ils ne perdent que de la silice et des bases. Fait remarquable, il n'y a pas de fer dans les percolats. Cet élément est donc fortement fixé dans les horizons B, et le transit d'eau pure n'a aucune action sur la stabilité des liaisons fer-argile.

2.2.2 - La percolation continue sur des horizons supérieurs

Contrairement à ce qui s'est passé lors de la manipulation sur les horizons B, des dépôts solides noirâtres ont été obtenus par la percolation continue sur des horizons organiques. Il s'agissait des prélèvements CAA et HF 391, tous deux situés entre 0 et 15 cm.

L'échantillon CAA, une fois lavé par de grandes quantités d'eau, a été analysé. On s'est aperçu que son taux de carbone total avait diminué de 8,52 à 7,84 %, et que le carbone de la fraction humique H2 et surtout celui de la fraction d'acides fulviques libres F1 avaient un peu diminué. Les autres caractéristiques étaient apparemment inchangées. Cependant, il faut signaler l'apparition de raies (aux RX) aux environs de 14 Å. Ces raies ne gonflent pas au glycecol, et de ce fait ont été interprétées comme caractérisant un minéral interstratifié (interprétation PINTA et Melle FUSIL à Bondy). La percolation a donc entraîné ou détruit des constituants organiques, en particulier des acides fulviques.

Le résidu solide recueilli dans les eaux percolées, contenait 18,1 % de carbone organique (méthode Anne, laboratoire de Bondy), soit 31,2 % de matière organique dans le résidu sec. La percolation a donc entraîné effectivement des produits organiques. Un calcul montre que la quantité de carbone recueillie dans le filtrat est un peu inférieure à la quantité totale de carbone qui a disparu dans le sol lavé. Ce sont donc les acides fulviques que l'on récupère dans le percolat. En supposant qu'elle le soit sous forme de kaolinite l'alumine combinée à de la silice représente 22,4 % de ce minéral argileux. L'excès de silice est de 10 % et le rapport SiO_2/Al_2O_3 du résidu est de 3,9. Le rapport fer/kaolinite, égal à 0,085, est un peu inférieur à celui existant dans le sol. Ces chiffres laissent à penser que l'alumine et la kaolinite migrent, en partie, indépendamment du fer. De plus, un diagramme RX effectué sur des quantités très faibles de produit entraîné a fourni les raies caractéristiques d'une kaolinite bien cristallisée et également celles du quartz. Des analyses d'amorphe ont également été effectuées. Elles indiquent que 1,46 % du fer (sur les 1,70 % entraînés) sont à l'état amorphe.

Nous déduisons de cette expérience les interprétations suivantes :

- le déplacement d'acides fulviques est effectif.
- ce déplacement se réalise en même temps que des quantités appréciables de kaolinite et de silice.

- la migration d'alumine chélatée est probable, mais elle ne paraît pas importante
- les départés de fer sont relativement plus faibles que ceux d'argile
- le fer migre essentiellement sous forme amorphe
- une partie seulement du fer de la fraction argileuse est lessivée, ce qui laisse supposer une certaine indépendance de migration de la kaolinite et du fer
- le titane peut être entraîné par lessivage et cet élément ne peut donc pas être considéré comme invariant
- des quartz extrêmement fins peuvent être entraînés pas le lessivage
- les quantités de bases entraînées par la percolation sont très importantes (15,4 % pour 31,2 % de matière organique).

Des résultats équivalents ont été obtenus sur l'autre échantillon de surface : HF 391. Les entraînements de fer sont cependant plus importants que pour le prélèvement CAA. La figure B 29 présente les résultats de dosage des formes amorphes sur le percolat. Le fer entraîné est essentiellement à l'état amorphe. Par contre l'alumine amorphe est en faible quantité, sa migration est donc très faible. Cette seconde manipulation confirme donc deux points :

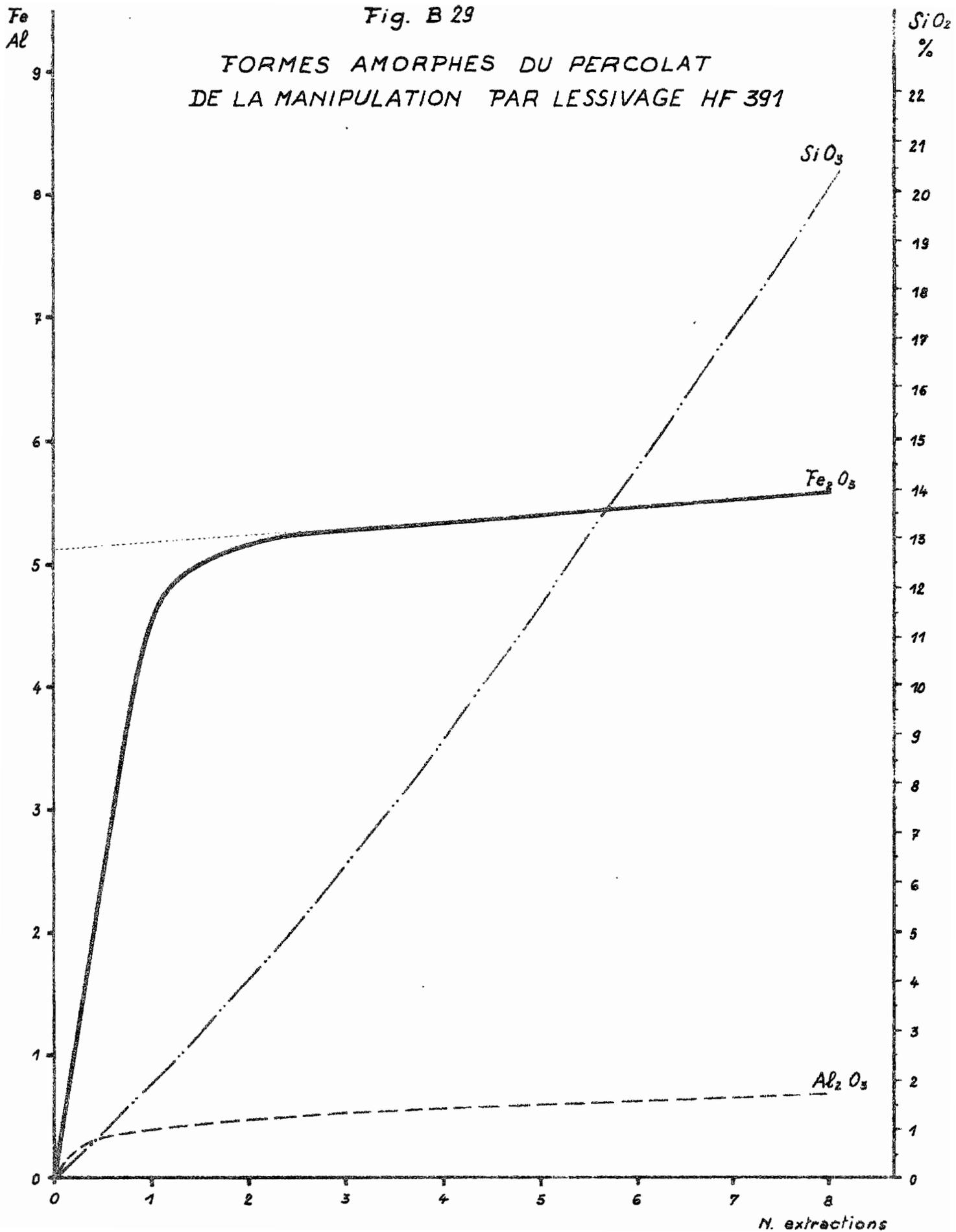
- la migration du fer se réalise sous forme amorphe
- la migration de la kaolinite se fait essentiellement sous forme de particules et peu sous forme de chélates-Al. C'est du moins le cas dans les deux échantillons retenus dans les manipulations.

2.2.3 - La percolation discontinue sur des horizons organiques

Une percolation discontinue, équivalant à une pluie quotidienne de 50 mm, a été effectuée sur les prélèvements CA 411 et CA 491. Dès le début de l'opération le liquide qui sort des allonges est très coloré. Rapidement, un fin dépôt solide tapisse le fond de l'erlemeyer.

Fig. B 29

FORMES AMORPHES DU PERCOLAT
DE LA MANIPULATION PAR LESSIVAGE HF 391



Deux séries d'analyses ont été effectuées :

- sur la solution percolée avant et après centrifugation,
- sur le résidu sec après centrifugation

Sur les solutions percolées et concentrées, un dosage par chromatographie a été effectué. L'idée était de rechercher les substances organiques hydrosolubles qui migreraient, et qui pourraient être responsables d'entraînements d'éléments. LOSSAINT (1956) en Europe, puis JUNG, BRUCKERT et DOMMERGUES (1968) sur des sols du Sénégal, ont noté le départ d'acides aliphatiques, de phénols, d'acides aminés et de sucres réducteurs après incorporation de litières. Dans les percolats recueillis, seules des traces d'acides phénols et d'acides protocatechiques ont été différenciées (analyses effectuées par JUNG et GARCIA au laboratoire de Biologie des Sols de Dakar). Les acides aliphatiques, très complexants vis-à-vis des anions simples, n'ont donc pas été décelés. Mais il est possible que les complexes ont une vie très courte et que des phénomènes de biodégradation les détruisent après filtration. Rappelons cependant que les échantillons ne comportaient pas de litière naturelle ou ajoutée.

Les solutions concentrées ont ensuite été centrifugées. La partie liquide, analysée la première ne contenait pas de fer ou d'alumine dosable à l'état soluble ou pseudo-soluble, mais des teneurs en silice de 24,5~~0~~ par ml. Cette quantité représente une exportation de 9,8 grammes de silice pour l'ensemble du filtrat, quantité à ajouter à la silice dans le dépôt solide.

Les dépôts solides au fond des culots de centrifugation ont été analysés ensuite. Leur poids est voisin de 500 mmg, ce qui est important. En effet, la terre a été entraînée par 27,5 litres d'eau percolant sur 4 Kg d'échantillon de surface (0 à 10 cm). L'entraînement représente donc des pertes de 0,1 % de substance. En pratique, le dispositif est l'équivalent d'une infiltration de trois années de pluviométrie en Casamance sur l'échantillon de surface. Un calcul, très théorique, montre qu'en 100 ans, 10 % du sol pourraient être entraînés en profondeur.

Les analyses triacides ont permis de définir la composition suivante des deux dépôts solides : tableau n° B 18

TABLEAU n° B 18 - Composition des produits lessivés :

Dépôt percolat	CA 491	CA 411
Kaolinite	73,3	62,0
Fer	5,75	6,0
Titane	1,4	1,1
Bases	4,0	3,9
Silice	9,8	11,0
Quartz	2,0	1,7
Eau et matière organique	3,75	14,3

Sur le prélèvement CA 411 un dosage de carbone a pu être effectué. Il indique une quantité de matière organique sèche de 4,3 %. Il y a donc toujours association d'argile et de constituants organiques.

Par rapport à la constitution de la fraction argileuse dans l'horizon de départ, le produit entraîné est un peu moins riche en fer, 5 à 6 % contre 7 à 8 %. Cependant une analyse par la méthode SEGALEN indique que ce fer est presque exclusivement à l'état amorphe. Le lavage des horizons B n'avait pas entraîné de fer amorphe. Par contre, le lavage des horizons supérieurs, où les quantités de fer sont pourtant moins importantes, a entraîné la forme amorphe. Il est donc logique d'attribuer cet entraînement au rôle de la matière organique. Pourtant, la proportionnalité fer-argile est partiellement conservée et même le rapport fer/argile du percolat correspond au rapport fer amorphe/argile dans le sol. Donc il n'est pas du tout établi que le fer migre seul indépendamment de l'argile, et il est même possible qu'il y ait déplacement d'un complexe kaolinite-fer amorphe-acides fulviques. Tout au moins, le point acquis est le rôle des acides fulviques dans la dégradation des pseudo-particules, ce qui libère l'argile et l'hydroxyde de fer et permet leurs migrations, sous forme liées ou indépendantes.

L'examen aux Rayons X du percolat indique la présence de kaolinite. Mais les pics de diffraction sont beaucoup moins intenses que ceux enregistrés sur le sol lessivé (cf. figure B 30). Deux explications peuvent être fournies. D'une part, les quantités de produits amorphes sont importantes, et elles doivent gêner la diffractométrie. D'autre part, la kaolinite qui migre est de taille très petite, nettement inférieure à 0,1 micron, et sa cristallinité est mauvaise.

Les faibles quantités de produits solides recueillis dans la manipulation ne permettent pas d'autres conclusions. Mais les résultats confirment ceux des manipulations en continu : le lessivage est prouvé comme mécanisme d'appauvrissement des horizons supérieurs; il se réalise toujours en liaison avec une migration de produits organiques, pratiquement d'acides fulviques. Les deux phénomènes sont liés génétiquement.

D - CONCLUSIONS SUR LA DIFFERENCIATION DES HORIZONS SUPERIEURS.

1) Les mécanismes de l'appauvrissement

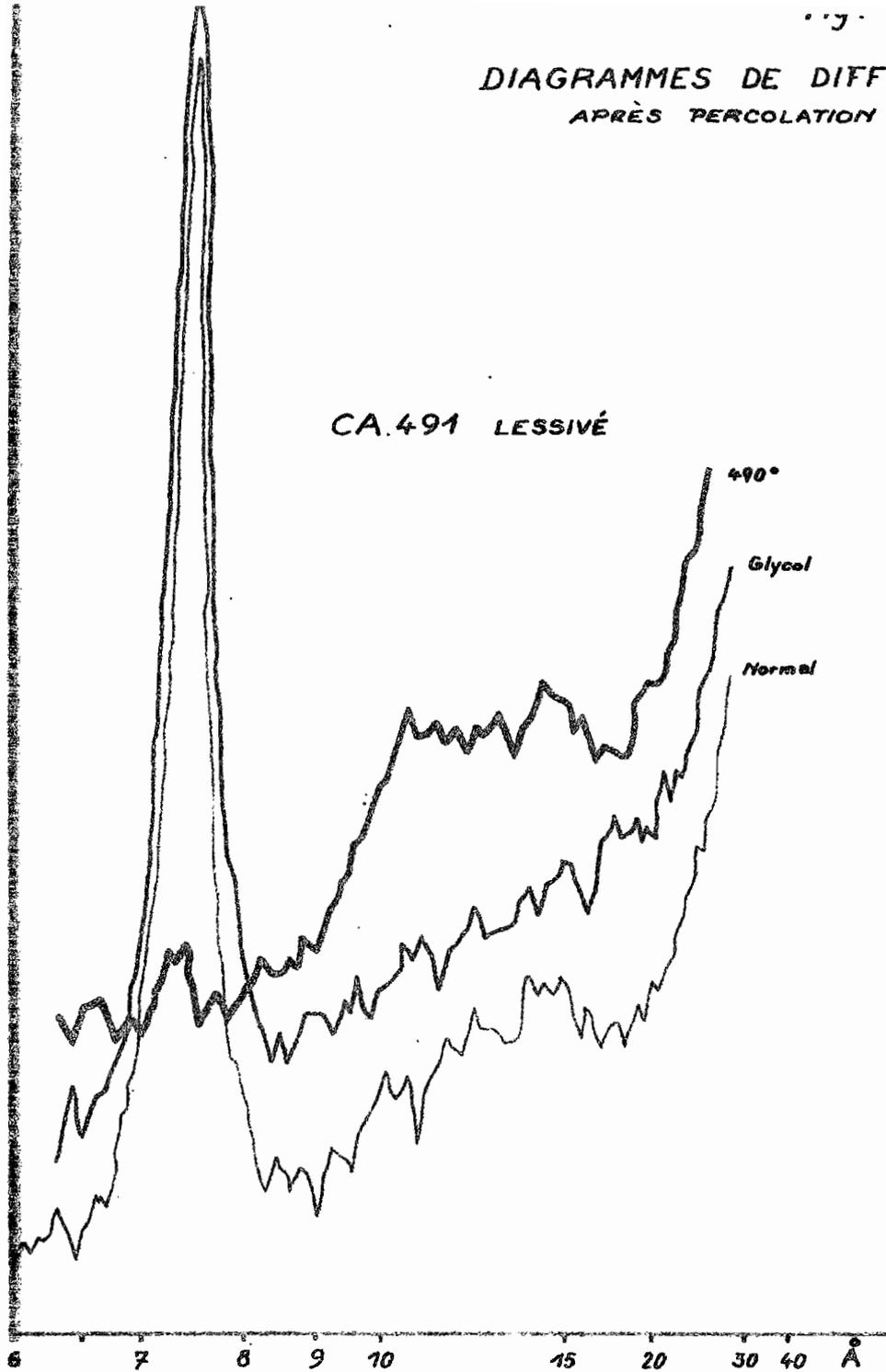
L'appauvrissement des horizons supérieurs des sols "rouges" sur grès est causé par deux mécanismes :

- le premier est l'érosion sélective de la fraction argileuse dans la couche la plus superficielle du sol. L'intensité de ce phénomène est variable suivant la position topographique et suivant le type de couverture végétale, et dans certains cas l'érosion expliquerait 75 à 80 % de l'argile entraînée. Des facteurs biologiques permettent le transfert progressif vers le bas d'une partie de l'appauvrissement superficiel.
- le deuxième mécanisme est l'entraînement des constituants en profondeur, c'est ce que l'on désigne sous le nom de lessivage, vertical ou oblique, mais l'importance relative de ces deux composantes n'a pas été précisée. Les constituants entraînés sont les suivants : acides fulviques, kaolinite, silice, hydroxydes de fer amorphe, bases, titane et aluminium non silicaté.

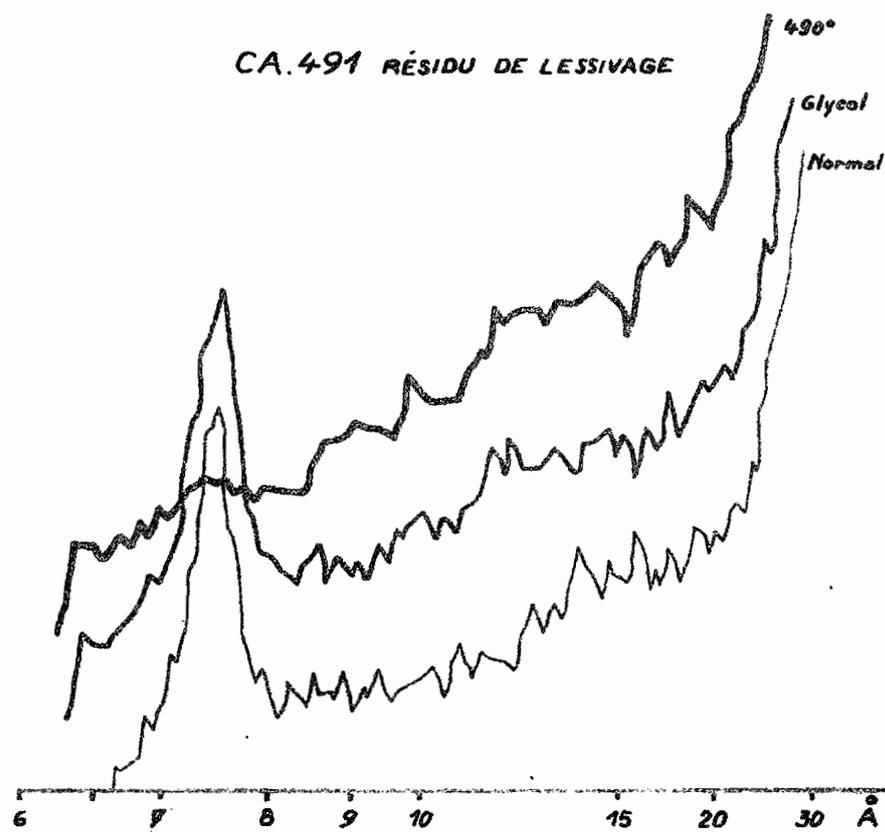
DIAGRAMMES DE DIFFRACTION RAYON X
APRÈS PERCOLATION DE CA 491

— 490°
— Glycol
— Normal

CA.491 LESSIVÉ



CA.491 RÉSIDU DE LESSIVAGE



Dans les deux mécanismes, le premier stade de l'évolution est nécessairement la diminution de stabilité des pseudo-particules. Il est indéniable que la matière organique et les facteurs microbiens ont un rôle important dans ce processus. Dans les deux mécanismes, l'intensité des phénomènes décroît progressivement avec la profondeur, tandis que leurs effets s'ajoutent et se renforcent en surface.

Dans le cas du lessivage, les modalités de transport ne sont pas toutes définies. Mais il est sûr que le fer et la kaolinite migrent en relation étroite avec les acides fulviques. Théoriquement, le fer libre ne migre que s'il est complexé ou si le potentiel redox est suffisamment abaissé pour un passage du fer ferrique au fer ferreux. Vues les bonnes conditions de drainage existant dans les sols rouges, c'est logiquement à l'état complexé que le fer peut se déplacer. Mais le problème de savoir si le fer amorphe et la kaolinite migrent isolément ou liés, n'est pas élucidé.

La dégradation de la kaolinite est un mécanisme relativement secondaire dans le cas des sols "rouges" sur grès. Ses effets s'ajoutent à ceux de l'entraînement mécanique des particules d'argile.

2) Modifications de l'équilibre pédogénétique

Les conséquences de l'action conjuguée des mécanismes précédemment évoqués sont la différenciation morphologique des horizons supérieurs. Toute modification des facteurs qui conditionnent l'intensité des mécanismes pourra donc se traduire par un changement d'équilibre du sol. Ces modifications d'équilibre peuvent avoir des causes variées :

- des changements climatiques. Ils ont des conséquences sur l'érosion, le bilan hydrique des sols, l'activité microbienne et l'évolution de la matière organique.
- des modifications de la pédogénèse dans les profils en amont. En particulier toute intensification des lessivages en fer et en argile peut perturber l'équilibre fer-argile des sols rouges situés en aval. C'est une possibilité que BOCQUIER, PAQUET et MILLOT (1970) ont évoqué pour d'autres sols.

Mais toutes les modifications d'équilibre se traduisent en premier lieu par un changement de stabilité des pseudo-particules. Ce sont ces dernières qui expliquent la résistance des sols rouges aux changements de pédogénèse, mais leur effet d'amortissement a évidemment des limites. En particulier, il est remarquable que les horizons B et les horizons appauvris ont une stabilité très différente sous l'action de percolations par l'eau. Il est donc possible que les horizons B de nombreux sols aient résisté à des changements pédo-climatiques importants, par une sorte de phénomène d'hysteresis (MAIGNIEN, 1956). Par contre, les horizons supérieurs, plus instables, ont pu être le siège d'évolutions pédologiques variées. Cependant ces dernières ne sont pas indépendantes de celles des horizons B. Elles les influencent, mais, semble-t-il, avec un certain décalage dans le temps, et c'est ce décalage qui complique le problème de la classification des sols. En fait, ce sont les acides fulviques qui ont la responsabilité d'une diminution de stabilité des pseudo-particules. Cet effet indirect de la matière organique est peu apparent, mais il est peut-être d'une très grande importance dans la différenciation des types pédologiques.

3) Problèmes de classification

En dessous de 1.000 mm de pluviométrie annuelle, de nombreux sols rouges paraissent inactuels. Dans certains cas, les caractères des horizons B sont hérités, et les horizons superficiels peuvent subir une évolution pédogénétique différente de celle conduisant normalement à la morphologie des sols "rouges". Au Sénégal en particulier, des sols ferrugineux tropicaux beiges apparaissent souvent en cours d'évolution sur d'anciens horizons B rubéfiés. Dans d'autres cas, l'évolution de la partie supérieure des profils semble arrêtée, en tout cas elle n'oriente pas la pédogénèse vers un changement de morphologie. Tous ces sols précédents peuvent être vieux (RUELLAN, 1970 a), et avoir des caractères relictés comme les pseudo-particules. Mais dans un cas, ils poursuivront leur évolution avec changement de morphologie, dans un autre ils n'évolueront plus que par érosion. Ces exemples indiquent la difficulté de bâtir une classification morphogénétique dans le cas des sols rouges. En effet, il faut saisir le

sens de l'évolution actuelle du sol, même si les premiers effets ne se sont pas concrétisés par des caractères morphologiques évidents. Pratiquement, pour résoudre ce problème, il faut examiner les caractères suivants :

- importance de l'accumulation d'acides fulviques dans l'horizon "intermédiaire"
- existence d'un éventuel horizon de "comportement"
- importance quantitative du lessivage par rapport à l'entraînement sélectif par le ruissellement
- détermination de critères micromorphologiques permettant de définir une orientation de la pédogénèse vers une concentration du fer amorphe dans la fraction de 0 à 2 microns, ou au contraire vers une libération du fer des surfaces argileuses.

Sur le plan de la classification, cette recherche consiste à préciser, et à analyser, les horizons de comportement et les horizons d'accumulation fulvique. Ce ne sont pas des horizons qui se définissent sur le terrain. Aussi, la classification des sols rouges sur grès suppose l'utilisation préalable des méthodes suivantes :

- micromorphologie (répartition du fer par rapport au plasma argileux)
- caractérisation et évolution de la composition de la fraction granulométrique argileuse
- évolution du fer libre et de sa fraction amorphe dans les horizons supérieurs dont l'étude doit être faite avec précision, et surtout par des prélèvements très serrés
- répartition des acides fulviques dans les horizons appauvris.

C'est après avoir fait la synthèse des renseignements obtenus, à l'échelle de la toposéquence, qu'un classement des sols sur des bases génétiques sera alors possible.

CHAPITRE VIII

RESUMES ET CONCLUSIONS GENERALES

Les sols de couleur rouge, développés sur les roches sédimentaires sableuses et gréseuses d'Afrique Occidentale, ont été étudiés dans ce travail. Ces sols, classés en ferrallitiques, occupent des surfaces importantes au Sénégal, en Haute-Volta, au Togo et au Dahomey. Les conditions de milieu où ils se sont développés sont assez variées.

Conditions d'ordre climatique

Au Sénégal, les pluviométries annuelles sont réparties entre 800 et 1.800 mm, en une seule saison des pluies de durée de 4 à 5 mois. Au Dahomey et au Togo, les précipitations sont du même ordre qu'au Sénégal, mais il y a deux saisons des pluies, l'ensemble s'étageant entre 5 et 6 mois. En Haute-Volta, le total pluviométrique annuel varie de 900 à 1.300 mm, en une seule saison de 4 à 5 mois de longueur.

Conditions d'ordre géologique

Au Sénégal, ainsi que dans le Sud du Dahomey et du Togo, les sols "rouges" sont développés sur des sédiments du Continental terminal. Ce sont des sables argileux contenant des niveaux de grès à ciment ferrugineux. Il s'agit d'un sidérolithique. En Haute-Volta, les sols n'apparaissent que sur un niveau gréseux particulier du Cambrien, les grès grossiers à yeux de quartz.

Mais il est apparu que toutes ces roches-mères ont un certain nombre de caractères communs. Ces derniers sont : la présence du quartz en quantités importantes, la pauvreté en minéraux primaires altérables, l'existence de presque tout le fer sous formes d'oxydes et hydroxydes individualisés, la richesse assez grande en sables des tailles moyennes et grossières. Par contre, le type de cohésion de ces roches-mères peut être très variable; s'étageant des sables non liés aux grès indurés.

Conditions particulières du milieu

L'étude monographique des sols a indiqué que les conditions de bon drainage sont essentielles. Il s'agit du drainage externe, les sols rouges les mieux caractérisés se trouvant sur les sommets d'interfluves. Mais des conditions de drainage interne suffisantes sont également nécessaires. Elles sont surtout déterminées par les caractéristiques de perméabilité des roches-mères sédimentaires. Cependant, la profondeur des nappes phréatiques est parfois un facteur déterminant.

Les sols

Les sols "rouges" sont caractérisés par une morphologie simple. En surface, un horizon sablo-argileux, enrichi en matière organique, d'épaisseur inférieure ou égale à 20 cm. En dessous, un horizon de transition devenant progressivement plus argileux, de couleur rouge ou rouge clair. A une profondeur variable, mais comprise entre 40 et 80 cm, débute un horizon de couleur rouge caractéristique, homogène à l'observation sur le terrain. Il contient des "pseudo-particules", ou "pseudo-sables", c'est-à-dire des grains de sables agglomérés par un ciment. Cet horizon, dénommé B rubéfié, peut atteindre des épaisseurs importantes, de l'ordre de 6 à 8 mètres. Ses teneurs en argile ne dépassent jamais le seuil de 55 %.

En profondeur, la transition avec les roches-mères se réalise plus ou moins rapidement, selon l'état de cohésion des matériaux originels.

Malgré l'éloignement géographique et la variation des climats, malgré la diversité des roches-mères, les sols ont donc une morphologie bien caractéristique. Cet ensemble de faits a incité certains auteurs à les considérer comme fossiles. Les climats fortement ferrallitisants qui leur auraient donné naissance, auraient disparu actuellement dans les régions où ils sont inventoriés.

Actualité de l'évolution pédologique

Tout au contraire, j'ai été amené à conclure que l'évolution d'une partie de ces sols se poursuit encore actuellement. Ceci résulte de l'étude de nombreux profils, décrits, analysés et comparés en fonction des

conditions climatiques, géologiques et géomorphologiques. C'est ainsi qu'en dessous de 800 mm de pluviométrie annuelle, les sols "rouges" sont en cours d'érosion, et ils ne subsistent plus que sur les points les plus élevés des modelés. Au-dessus de 1.000 mm, la grande épaisseur de la couverture sur certains modelés, suggère un équilibre entre décapage par érosion et approfondissement du sol. Au-dessus de 2.000 mm, les conditions climatiques sont défavorables à la conservation de la rubéfaction. Aussi, c'est entre 1.200 et 1.800 mm que l'actualité de l'évolution des profils de sols rouges est la plus probable. Ces conclusions nous ont amené à comparer les sols "rouges" avec d'autres types de sols bien drainés.

Comparaison avec des sols différents

Les comparaisons ont consisté à ne faire varier qu'une seule variable à la fois, tout à tour la position dans la toposéquence, le climat, enfin la roche-mère. Les sols développés sur les mêmes roches-mères et situés dans des toposéquences de sols rouges, ont été appelés "associés". Leur position géomorphologique est la variable principale qui peut expliquer une pédogénèse différente de celle des sols "rouges".

Les sols différents, mais développés sur des roches-mères identiques, et en position de bon drainage, ont été appelés "sols comparés". Les conditions climatiques représentent le facteur primordial de leur différenciation particulière.

Les sols dont la morphologie est très voisine de celle des sols "rouges", mais qui sont développés sur des roches-mères différentes des grès et des sables, ont été appelés "sols comparables". Les causes de la similitude morphologique sont essentiellement certains caractères des roches-mères et certaines données climatiques.

Ces comparaisons systématiques ont été précieuses pour parvenir à déterminer les facteurs essentiels de la pédogénèse des sols rouges. Et c'est ainsi qu'est apparu le rôle déterminant du bilan hydrique des profils. C'est lui qui conditionne l'équilibre des liaisons fer-argile. Quand cet

équilibre est stable, la structure interne du sol l'est aussi, et les profils de sols "rouges" se conservent, ou se développent en s'approfondissant. Quand la liaison fer-argile est perturbée, la morphologie des profils est nettement modifiée. Ces comparaisons ont également mis en évidence l'importance de la présence du quartz dans l'orientation de la pédogénèse vers une libération, ou non, de gibbsite. Elles ont enfin souligné le rôle probablement prépondérant du climat de type tropical, à saisons alternantes.

Etude de deux toposéquences

La simple étude monographique des sols ne permettait cependant pas de pousser plus loin les conclusions précédentes. Il était nécessaire de caractériser la pédogénèse, c'est-à-dire de préciser les mécanismes responsables de la différenciation des horizons diagnostiques. La première étape était de définir le mode de transformation de roches variées en horizons B rubéfiés, la seconde d'analyser la transformation de ces dernières en horizons supérieurs appauvris.

Deux toposéquences ont été choisies sur des roches-mères très différentes, alors que les profils de sols se révélaient très comparables. La première a été étudiée au Sénégal, en Casamance, sur des niveaux de grès argileux ferruginisés. La seconde a été installée en Haute-Volta, près d'Orodara sur des sables légèrement argileux avec des passées de grès ferrugineux.

Caractérisation des roches-mères

La première difficulté a été de caractériser la roche-mère qui avait effectivement été transformée en sol. En effet, dans les roches sédimentaires, les bancs se succèdent, et ils sont souvent différents. Il n'est jamais prouvé que le banc qui a engendré un sol était semblable à celui qui est aujourd'hui sous le profil. Pour surmonter cette difficulté, j'ai utilisé la méthode d'étude latérale des profils. Sur un versant en pente régulière, plusieurs puits sont creusés. Chaque banc sédimentaire vient latéralement à l'affleurement en se transformant en sol. On compare donc chaque horizon de sol avec la formation géologique qui lui correspond latéralement. Il faut au préalable connaître le pendage, généralement faible, de la formation sédi-

mentaire. Il faut ensuite s'assurer que chaque formation ou banc est homogène dans le déplacement latéral envisagé. Pour cela, je me suis basé sur la comparaison des granulométries des sables quartzeux. La constance de la répartition granulométrique du squelette quartzeux était le test d'une permanence suffisante des caractères des roches-mères.

Transformation du squelette quartzeux

L'étude de l'évolution du squelette quartzeux d'une série de couches sédimentaires nous a fourni des résultats inattendus. Dans tous les niveaux, il y a une tendance à la diminution systématique de la taille des quartz, surtout dans les fractions les plus grossières. Cette modification de la granulométrie ne peut être mise au compte de la sédimentation. Elle est toujours dans le même sens, quelle que soit la roche-mère, et elle ne peut être que d'origine pédogénétique. Les examens des sables indiquent que le phénomène est associé à l'enrichissement en fer du milieu. Les grains de quartz se fissurent, et les canalicules se bourrent de fer, Les quartz les plus grossiers prennent des aspects cariés, suggérant une perte de silice. Certains se fragmentent complètement, tandis qu'une matrice argilo-ferrique envahit progressivement le milieu. L'intensité la plus élevée de ces phénomènes se situe dans la zone de passage des roches-mères aux horizons B rubéfiés. Dans les horizons rouges du sol, l'évolution de la taille des sables semble limitée. L'explication en est probablement la mise en réserve des quartz par la constitution des "pseudo-sables". Dans les horizons supérieurs, il y a une nouvelle évolution des quartz. Les tailles les plus grossières, et les tailles les plus fines (inférieures à 100 microns) diminuent en pourcentage par rapport aux sables moyens. Le premier effet de la pédogénèse est donc une transformation sensible du squelette quartzeux en provenance des roches-mères.

Les facteurs et les mécanismes de la pédogénèse

Les transformations du squelette sableux dans le passage des roches-mères aux sols étant décrites, il a été possible de cerner les mécanismes de la pédogénèse. L'examen successif de la transformation des matériaux originels en horizons B, puis de ces derniers en horizons appauvris,

permet de caractériser la pédogénèse par une série de facteurs et de mécanismes.

Les facteurs essentiels.

Trois facteurs essentiels président à l'évolution des sols rouges : le bilan hydrique, la matière organique, les facteurs biologiques.

- Le bilan hydrique. La quantité d'eau qui percole à travers le profil, soit verticalement, soit obliquement, doit dépasser un certain seuil pour que l'approfondissement des sols puisse se poursuivre. En dessous de un mètre de pluviométrie annuelle, il semble que cet approfondissement ne se fasse plus, du moins pour les profils les plus épais. L'équilibre approfondissement-érosion est modifié au profit de cette dernière. Au-dessus de deux mètres de pluviométrie, le bilan hydrique semble être défavorable à la stabilité des relations fer-argile. Les profils se désaturent fortement et la rubéfaction disparaît.

Mais une partie seulement de l'eau de pluie s'infiltré, percole ou est évapotranspirée. L'eau qui ruisselle agit en effectuant un entraînement sélectif des fractions les plus fines des horizons superficiels. C'est une des causes de l'appauvrissement.

- La matière organique. Les quantités de matières organiques sont peu importantes (1 à 2 %), et l'horizon qu'elles colorent ne dépasse pas 20 cm d'épaisseur. Les résultats d'analyses indiquent cependant la présence de quantités dosables d'humus jusqu'à la base des profils, parfois à 8 mètres de profondeur. En surface, il y a dominance d'acides humiques. Ensuite, dans la zone de décroissance rapide des teneurs en valeur absolue de l'humus, les acides fulviques deviennent à leur tour dominants en valeur relative. La répartition des sols rouges est donc associée à la présence d'une certaine quantité d'acides fulviques dans le profil. Mais il apparaît que les rapports acides fulviques sur acides humiques ne doivent pas dépasser un certain seuil au-delà duquel la rubéfaction serait contrariée. La matière organique apparaît comme un facteur déterminant de la pédogénèse conduisant à la différenciation des horizons appauvris.

- Les facteurs d'ordre biologique. Des organismes comme les vers et les termites sont un puissant facteur d'homogénéisation des horizons supérieurs du fait de transports de particules. Mais la vie microbienne a, également, un rôle important dans la pédogénèse. Elle oriente la transformation, en quantité et en qualité, des matières organiques, elle facilite la création des chélates, elle est aussi à l'origine de la biodégradation d'une partie des chélates et des complexes organo-minéraux qui ont migré. Toute variation de la qualité de la vie microbienne peut donc avoir des répercussions sensibles sur l'évolution pédogénétique d'un sol.

Les mécanismes

Une série de mécanismes fonctionne sous l'influence des facteurs énumérés précédemment.

- Migration d'acides fulviques

Le premier mécanisme semble être un déplacement des acides fulviques. Ces derniers migrent très profondément. Ils ont de plus tendance à l'accumulation entre 30 et 55 cm. Cette migration est associée, dans les horizons supérieurs, à une série de phénomènes d'inégales importances. D'abord, la dislocation du quartz s'accélère. Ensuite, il y a une diminution nette des teneurs en argile granulométrique, ainsi que de celles des hydroxydes de fer. Il y a également diminution de stabilité des pseudo-particules. Ces variations sont de moins en moins accusées, au fur et à mesure que l'on descend dans le profil, au fur et à mesure donc que les possibilités d'entraînement de l'eau diminuent et que la teneur en acides fulviques s'affaiblit par biodégradation et minéralisation.

- Libération et migration de la silice

Les figures de corrosion et les formes émoussées des sables suggèrent la dissolution du quartz, et donc une libération de silice. De plus, les calculs géochimiques permettent la comparaison des teneurs en quartz en fonction des éléments Fe, Al, et Ti. Ils conduisent à la conclusion d'une disparition plus ou moins importante du stock initial de quartz,

en particulier dans les horizons C de transition aux roches-mères. La dissolution du quartz peut y atteindre 50 % dans le cas de roches très sableuses. Sur le plan de la thermodynamique, la dissolution du quartz, surtout en l'absence de feldspaths, est possible pour des teneurs en silice comprises entre 1 et 6 ppm dans les eaux de percolation. Le mécanisme de dissolution des quartz est donc tout à fait plausible à certaines périodes de l'année. La silice solubilisée est exportée hors des profils. Ceci est confirmé par une teneur de 10 à 15 ppm en silice soluble dans les nappes qui circulent sous les sols.

- Migration de l'argile

Les teneurs en argile (de 0 à 2 microns) dans les horizons supérieurs sont systématiquement plus faibles que dans les horizons profonds. Ce phénomène est d'origine pédogénétique, et il définit une notion d'appauvrissement. Il y a migration de tous les constituants de la fraction granulométrique argileuse, c'est-à-dire la kaolinite, mais aussi le quartz très fin et les hydroxydes. Les résultats des manipulations ont prouvé que la migration s'effectuait en grande partie par l'intermédiaire de complexes ou de chélates en liaison avec les acides fulviques. Mais les migrations de la kaolinite et celles des hydroxydes de fer ne seraient pas forcément liées. Elles seraient toutefois consécutives à une diminution préalable de la stabilité des liaisons fer-surfaces argileuses causée probablement par l'action des constituants organiques. Le fer serait proportionnellement moins entraîné que la kaolinite, probablement parce que seule la fraction amorphe se déplace.

De plus, il s'avère que la kaolinite migre surtout sous forme de particules. Cependant une dégradation de ce minéral argileux dans les horizons de surface est admise. Elle serait d'importance relative faible. Lors de la dégradation de la kaolinite, l'alumine libérée pourrait migrer sous forme de chélates, et une recombinaison avec de la silice s'effectuerait en profondeur. La dégradation de la kaolinite se réaliserait quand les eaux de percolation contiennent moins de 1 ppm de silice. Cette condition doit être respectée dans les horizons les plus superficiels, à certaines périodes

de l'hivernage. Mais le phénomène est rapidement freiné par la libération de silice en provenance du quartz.

Le devenir des migrations d'argile granulométriques, (0 à 2 microns) c'est-à-dire de la kaolinite et des hydroxydes de fer, mais aussi d'une partie du titane et du quartz contenus dans cette fraction, est triple :

- enrichissement préférentiel des pseudo-particules dans toute la masse des horizons B. Il n'y a pas, en effet, d'horizon d'accumulation apparente de l'argile dans les profils de sols rouges, mais une accumulation diffuse réelle.
- approfondissement progressif du sol au dépend des matériaux qui s'argilifient progressivement.
- enrichissement en argile de certains profils de sols situés vers le bas des toposéquences de sols rouges (sols "associés", soit sols ferrugineux tropicaux, soit sols hydromorphes).

Ces migrations d'argile sont classiquement appelées lessivage. Il n'a pas été possible de préciser l'importance respective du lessivage vertical et du lessivage oblique.

- La rubéfaction

La rubéfaction est un phénomène qui se développe d'abord en profondeur dans les sols, et qui est caractéristique des horizons B. Ce phénomène de coloration est en relation étroite avec la présence d'hydroxydes de fer sous forme dite amorphe. Le front de rubéfaction qui progresse dans les matériaux est discontinu, et il suppose un piègeage du fer en transit par les surfaces argileuses. Le piègeage a pour conséquence la création des pseudo-particules, dont la présence permet un bon drainage interne. Les conditions de bon drainage facilitent à leur tour la conservation de l'équilibre créé. De plus, il est probable que la présence de silice soluble stabilise l'état amorphe du fer et donc la rubéfaction.

Cependant, dans les horizons supérieurs, la liaison fer-argile perd sa stabilité sous l'influence des acides organiques. Les pseudo-particules tendent à se dissocier, et la perte de protection ferrugineuse permet, ou du moins, facilite la migration de la kaolinite, par lessivage ou par érosion sélective.

Le fer également se déplace, mais les modalités de migration sont encore mal définies, bien que ce soit la forme amorphe qui soit uniquement en cause. Le fer qui a pu transiter est piégé fortement à la base des profils. Mais une quantité qui semble très limitée peut poursuivre son transport en solution vers les sols de bas de toposéquence, et vers les nappes phréatiques.

- L'érosion sélective

Le ruissellement entraîne surtout des particules de la taille des argiles et des limons, ce qui se traduit par un enrichissement relatif en sables de l'horizon le plus superficiel. L'appauvrissement ainsi réalisé serait partiellement transmis en profondeur par des actions d'origine biologique. Il n'est cependant pas facile de séparer la part du lessivage de celle de l'érosion sélective dans la différenciation des horizons supérieurs, car les deux mécanismes conjuguent leurs effets dans le même sens. Leurs intensités diminuent progressivement avec la profondeur, et elles dépendent de la position dans la toposéquence.

La différenciation en horizons

L'interaction des divers mécanismes décrits ci-dessus provoque la différenciation des sols en horizons.

Les horizons appauvris

Il s'agit des horizons supérieurs des sols. La notion d'appauvrissement proposée définit un fait morphologique, mais dont on s'assure que l'origine est strictement pédogénétique. Elle exclut les phénomènes de recouvrement mécanique par érosion, ou les hétérogénéités d'origine sédimentaire. Dans le cas des sols rouges sur grès, l'appauvrissement est la somme de l'entraînement sélectif de l'argile par le ruissellement, du lessivage vertical et oblique des constituants de l'argile, de la lixiviation des bases, enfin de la migration de certains éléments (silice, alumine).

Les horizons appauvris peuvent être subdivisés : en un horizon à matière organique directement décelable sur le terrain, en un horizon enrichi en acides fulviques, en un horizon de transition où l'appauvrissement diminue avec la profondeur. Dans certains cas, ce dernier horizon fait passage à un sous-horizon, où la dispersabilité de l'argile est plus grande que dans les horizons B sous-jacents. La diminution de stabilité des pseudo-sables y provoque l'apparence d'une richesse plus élevée en argile granulométrique, d'où le nom "de comportement" donné à cet horizon. Le front d'appauvrissement évolue dans le temps en attaquant progressivement les horizons B, qui se comportent comme de véritables roches-mères. Les vitesses respectives de la descente du front d'appauvrissement et de l'érosion superficielle déterminent donc la morphologie de la partie supérieure des sols dans l'ensemble des toposéquences.

Les horizons B diagnostiques

Les horizons profonds rubéfiés sont très épais. Ils peuvent dépasser six mètres. Ils sont généralement de texture homogène, sauf quand la digestion d'une roche-mère gréseuse est incomplète. Ils ont été dénommés horizons B, car il y a accumulation d'argile et de fer. Cette accumulation est double, absolue par importation d'argile et de fer, mais aussi relative, par exportation de silice. Le fer importé se met en place dans la fraction granulométrique argileuse en modifiant les proportions de ses constituants. L'introduction de ce fer, ainsi que d'une certaine quantité de quartz finement pulvérisé dans la fraction 0-2 microns, représente une forme d'argilification complémentaire. La fraction granulométrique argileuse, créée ou importée, s'insère entre les grains du squelette quartzeux en constituant les pseudo-particules. En définitive, l'interaction des divers mécanismes d'augmentation de la fraction argileuse, et de mise en place de fer amorphe sur les pseudo-particules, se traduit par le phénomène de rubéfaction. Ce dernier représente donc un aspect important de la pédogénèse, qui se réalise sans aucun phénomène de concrétionnement.

Les horizons C

Ils ont été définis comme les horizons de passage des horizons B rubéfiés aux roches-mères. Leur morphologie est variable. Dans certains cas, il s'agit, au dépend de roches sableuses, du front d'approfondissement du sol par enrichissements discontinus en argile et en fer. Dans d'autres cas, il s'agit de grès en voie d'altération et de digestion. Enfin, il y a des cas où les caractères hydromorphes sont indéniables, en rapport avec la présence d'une nappe plus ou moins temporaire. La détermination de la limite inférieure des horizons C est difficile à préciser, et elle est compliquée par l'hétérogénéité de certaines roches-mères. De plus, il est établi que la pédogénèse peut se traduire par une transformation de ces roches-mères très profondément, en particulier par des apports de fer, de kaolinite ou de silice. Mais, en pratique, les horizons C ont été limités à la zone où les roches-mères subissaient le plus de transformations apparentes d'origine pédogénétique.

C'est dans l'horizon C que les transformations des quartz sont les plus fortes. C'est également la zone où l'enrichissement relatif par départ de silice est la plus importante. Des évaluations permettent d'évaluer les départs de silice, dans le cas particulier de roches-mères très sableuses, à plus de 50 % de la masse initiale des quartz. Contrairement aux horizons B, l'accumulation relative y est plus importante que l'accumulation absolue. Mais il y a toujours superposition des deux phénomènes.

Conséquences de la différenciation pédologique

Au cours du temps, les fronts d'approfondissement du sol et d'appauvrissement tendent à se déplacer vers le bas, tandis que l'érosion superficielle rabote la surface topographique. Tout se passe comme si, peu à peu, le profil de sol se déplaçait vers la profondeur. Les transits successifs d'argile et de fer conduisent à une concentration progressive de constituants, compte tenu des effets de l'érosion accélérée qui enlève d'abord les horizons les plus appauvris. De leur côté, les exportations continues de silice sont une nouvelle cause de concentration, cette fois non seulement du fer et de l'alumine, mais également des autres constituants, dont le titane.

Lorsque les taux d'argile atteignent une valeur de l'ordre de 50 %, il semble que les concentrations en argile et en fer arrivent à un seuil. Le piégeage ne se réalise plus dans les horizons B, mais à leur base. Le sol s'approfondit progressivement. C'est ainsi que des roches-mères très variées tendent à se transformer en horizons B argilo-sableux rouges qui se ressemblent tous sur le terrain. Il s'agit d'un phénomène de convergence vers une sorte de "modèle" valable pour toutes les roches-mères riches en quartz. Ce modèle contient 40 à 50 % d'argile et 4 à 6 % de fer. Le rapport du fer libre sur l'argile est de 10 à 12 %. Il est remarquable que ce rapport varie assez peu dans la population des horizons B étudiés. Il correspond d'ailleurs au chiffre théorique de saturation par le fer de la surface des argiles kaolinitiques.

Et ceci mène à une des conclusions de ce travail, la pédogénèse fait converger vers un état moyen, homogène morphologiquement, les roches-mères les plus diverses : on y voit la raison des caractéristiques si constantes des sols "rouges" ferrallitiques les mieux développés.

Modifications de l'équilibre pédogénétique

Les horizons B des sols rouges paraissent avoir une grande stabilité, explicable par le mode de liaison fer-quartz-argile. Les horizons supérieurs, cependant, peuvent être le siège d'évolutions nouvelles. La création d'un horizon dit de "comportement" serait le premier stade d'un changement morphologique, dont le terme ultime serait la morphologie des sols ferrugineux tropicaux à concrétions.

Les causes de modifications du sens de la pédogénèse se rapportent aux trois facteurs précisés ci-dessus, mais surtout au régime de l'eau et aux constituants organiques.

- La modification du bilan hydrique due, en particulier à des changements climatiques, peut avoir deux conséquences. Dans le sens de l'assèchement, les sols s'érodent de plus en plus rapidement. Les profils restent très

rouges mais perdent leurs horizons appauvris, et se limitent peu à peu aux parties hautes ou bien drainées des modelés. Dans le sens d'une augmentation de la percolation, la désaturation des profils augmente, les horizons supérieurs s'éclaircissent, et ils deviennent souvent jaunes par perte de leurs hydroxydes de fer amorphe.

- la modification des caractéristiques des constituants organiques explique également certains cas de dégradation des sols. Cette modification peut avoir pour cause des changements climatiques, ou des changements de végétation. C'est ainsi qu'en Casamance, le défrichement de la forêt, suivi d'une mise en culture mécanisée, a provoqué une baisse des teneurs en matière organique de plus de 50 % par rapport au stock sous forêt. Très rapidement, on a noté une modification des propriétés structurales des horizons superficiels, et une tendance à l'éclaircissement de la couleur rouge des horizons sous-jacents. Une nouvelle évolution a débuté, dont il faut souligner la grande rapidité dans le temps. Elle semble orienter la pédogénèse vers une diminution des qualités de drainage, et vers une diminution de la stabilité des pseudo-sables, avec pour terme ultime la ségrégation du fer et son concrétionnement. Dans ces conditions, il est probable que de nombreux sols ferrugineux tropicaux beiges lessivés à concrétions, dérivent d'anciens sols "rouges", peut-être par simple modification du couvert végétal (savanisation ou actions culturelles).

Influence de la pédogénèse sur la géographie du pays

- Dans la zone de prédominance des sols "rouges", le schéma d'approfondissement du profil aboutit à la formation d'une couverture de sol d'épaisseur considérable. Les nappes phréatiques sont généralement profondes, et les soutirages au vide par exportations de silice provoquent souvent la création de dépressions fermées. Au cours du temps, la surface initiale du modelé peut être abaissée sensiblement par la conjonction de l'érosion et de l'approfondissement des sols. En même temps une tendance à la création de buttes amorties se fait jour.

- Hors de la zone des sols rouges, la dynamique de la silice se traduit par des silicifications nombreuses, surtout observées au pourtour des régions gréseuses ou sidérolithiques. Il en serait de même pour certaines silicifications sahariennes mises à nu par une érosion intense des sols. La formation de certains niveaux à diatomées de l'Ouest Africain pourrait également avoir été influencée par une pédogénèse rubéfiante du type défini pour les sols rouges sur grès. Les nappes qui se rapportent à ce type de pédogénèse sont en effet riches en silice et très pauvres en autres éléments minéraux.

Par contre, l'hypothèse de la formation de grès ferrugineux sous l'influence de la pédogénèse n'a pas pu être vérifiée. Il semble que la grèsification serait plutôt la conséquence d'une évolution pédologique se traduisant par une grande exportation de fer ferreux vers des nappes. Il en serait de même des cuirassements ferrugineux, qui diffèrent des grèsifications par le mode de mise en place du fer par rapport aux squelettes quartzes. La grèsification et le cuirassement seraient facilités par le développement d'une pédogénèse différente de celle définie dans le cas des sols "rouges". Cette dernière, que l'on peut qualifier de pédogénèse rubéfiante, serait caractérisée par la pseudo-particulation.

En conclusion, morphogénèse et pédogénèse sont liées. La morphogénèse détermine surtout les conditions de drainage externe, ce qui peut, dans certaines conditions orienter une pédogénèse rubéfiante. Une fois déclanchée, cette dernière influence l'évolution ultérieure des modelés.

Place des sols dans la classification

Les sols sont classés comme ferrallitiques, compte tenu des caractères géochimiques des horizons B. Mais les matériaux originels possèdent déjà ces caractères, et la classification en sols ferrallitiques reflèterait donc plus un caractère hérité qu'un fait génétique. En fait, les diverses comparaisons qui ont été faites entre le point de départ

(roches-mères) et d'arrivée (sol) nous ont indiqué que la morphologie des profils était, au contraire, le résultat d'une évolution importante et probablement longue. Pour classer valablement les sols, il me semble donc judicieux d'essayer de définir une hiérarchie des mécanismes et des caractères, en fonction de leur importance dans la morphologie des profils.

Le premier mécanisme semble être le départ considérable de silice à partir des quartz. Il justifie, à lui seul, un classement en sols ferrallitiques. Ce mécanisme n'est pas spécifique des sols "rouges" en question. Il a été décrit et évalué dans certains profils ferrallitiques, et il existe probablement dans d'autres sols sur roches siliceuses. Mais ce mécanisme est isolé, et intense, dans le cas des sols "rouges", et on peut donc plus facilement le mesurer. Nous pensons qu'il est si intense c'est parce qu'il n'y existe aucun silicate capable de fournir la silice aux solutions. C'est le quartz qui se dissout, et les conditions thermodynamiques pour cette dissolution semblent exister, tout au moins à certaines périodes de l'année.

La rubéfaction est le second caractère à prendre en considération. Son mécanisme est lié à la dynamique de la silice, et il représente les faits suivants : fer entièrement à l'état libre, intégration du fer à l'état amorphe dans la fraction argileuse, création de pseudo-particules modifiant la texture apparente et favorisant un drainage libre. La dynamique du fer peut être décrite comme une concentration progressive de fer libre à l'état amorphe dans les horizons B. Elle serait à opposer à d'autres types, soit de lessivage du fer amorphe hors des profils, soit de répartition différente du fer par rapport aux argiles (concrétionnement). La pédogénèse rubéfiante, diagnostiquée par la morphologie des horizons B, pourrait donc représenter une sous-classe génétiquement bien caractérisée dans la classification.

Le troisième caractère à retenir est la dynamique de l'argile. Dans les sols rouges il y a : d'une part lessivage vertical et oblique

d'une partie de l'argile des horizons supérieurs; - d'autre part accumulation dans les horizons B, non seulement par accumulation absolue, de façon diffuse, mais aussi par accumulation relative résultant de la dissolution des quartz.

En quatrième position dans la hiérarchie viennent les caractères des horizons appauvris, l'accent étant mis sur la non-gibbsitisation, le mode de répartition des acides fulviques, les caractères de saturation par rapport aux horizons B et C.

Enfin, au niveau de la famille, il serait judicieux de faire apparaître la richesse en quartz, et l'état de saturation des roches-mères.

En conclusion les mécanismes pédogénétiques des sols rouges ont été mis en évidence, et soulignés d'une manière particulière, en raison des caractères spécifiques des roches-mères. Ces dernières sont riches en quartz, très pauvres en minéraux altérables, et possèdent une bonne porosité. Certains matériaux des régions tropicales présentent de tels caractères. Les deux principaux auxquels on songe, compte tenu des surfaces couvertes, sont les manteaux ferrallitiques autochtones et épais des pénéplaines anciennes et les remaniements allochtones de ces manteaux, c'est-à-dire toutes les formations sidérolithiques.

Certains des mécanismes pédogénétiques invoqués dans le cas des sols rouges pourraient donc être retrouvés dans d'autres types de différenciation morphologique. Nous songeons, en particulier, à la modification de granulométrie des quartz, à la dissolution de la silice, à l'enrichissement en hydroxydes sous forme amorphe, à l'individualisation de pseudo-particules, à l'approfondissement des profils par concentration progressive de certains éléments, surtout du fer, à l'appauvrissement en surface sous l'influence des acides fulviques.

Il est probable que les voies de recherche ainsi tracées, conduiront à modifier certaines des interprétations que nous avons proposé. Une meilleure connaissance de la pédologie tropicale devrait en être la conséquence. C'est l'espoir que nous formulons après l'étude des sols rouges ferrallitiques sur sables et grès d'Afrique Occidentale.

B I B L I O G R A P H I E .

(443 références)

- ACQUAYE (D.K.), TINSLEY (J.) - 1965 - Soluble silica in soils. *Experimental Pedology*, pp. 126-148, Butterworth, London.
- ADAM (J.G.) - 1965 - Généralités sur la flore et la végétation du Sénégal. Dans *Etudes Sénégalaises* n° 9, fasc. 3. Climat - Sol - Végétation C.D.R.S. St Louis du Sénégal, pp. 155-214.
- MC ALEESEE (D.M.), MC DONAGHY (S.) - 1958 - Studies on the basaltic soils of Northern Ireland. III Exchangeable cation contents of sand, silt and clay separates. *The Journal of Soil Science*, Oxford, Vol. 9 n° 1, pp. 66-75
- ALEXANDER (G.B.), HESTON (W.M.), ILER (K.) - 1954 - The solubility of amorphous silica in water, *Geoch. Cosmoch. Acta.* 12, pp. 123-132.
- ALEXANDER LYLE (T.), CADDY JOHN (G.) - 1961 - Genesis and hardening of laterite in soils. *Tech. Bull. n° 1282. Soils Cons. Service U.S.D.A.*, 90 p.
- ALIMEN (H.), DEICHA (G.) - 1958 - Observations pétrographiques sur les meulière pliocènes. *Bull. Soc. Geol. Fr.*
- ARIAL (G.) - 1963 - Importance du fer et de sa mobilité dans les sols tropicaux. Comparaison des deux méthodes d'analyse du fer libre: DEB et D'HOORE. Ronéo Centre ORSTOM, Dakar, 72 p.
- ARISTOVSKAYA (T.V.), DARAGAN (A.YU.), ZYDINA (L.V.), KUTUZOVA (R.S.) - 1969 - Microbiological factors in the movement of some mineral elements in the soil. *Soviet Soil Science* n° 5, pp. 538-546.
- ASHAYE (T.I.) - 1969 - Teneur en sesquioxyde et granulométrie de douze sols nigériens provenant de grès. *Sols Africains*. Vol. XIV n° 1-2, pp. 97-108.
- AUBERT (G.) - 1941 - Les sols de la France d'Outre-mer. *Impr. Nation. Paris*. 90 p.
- AUBERT (G.) - 1946 - Cours de Pédologie de l'ORSTOM. Inédit.
- AUBERT (G.) - 1954 - La classification des sols utilisée dans les territoires tropicaux de l'Union Française. *C.R. Deux. Conf. Int. Sols. Léopoldville* Tome II, pp. 705-708.
- AUBERT (G.) - 1959 - Influence des divers types de végétation sur les caractères de l'évolution des sols en régions équatoriales et subéquatoriales ainsi que leurs bordures tropicales semi-humides. *Colloque d'Abidjan UNESCO : sols et végétation des régions tropicales*.
- AUBERT (G.) - 1963 - La classification des sols. La classification pédologique française. *Cahiers ORSTOM, Pédologie* n° 3, pp. 1-7.

- AUBERT (G.) - 1966 - Classification des sols utilisée par les pédologues français
Rapport on the fifth meeting of the advisory. Panel Moscou, Ronéo.
- AUBERT (G.), DUCHAUFOR (PH.) - 1956 - Projet de classification des sols. VIème
Congrès Intern. Sci. du Sol. Paris. V, 97, Vol. E, pp. 597-604
- AUBERT (G.), HENIN (ST.) - 1945 - Relation entre le drainage, la température et
l'évolution des sols. C.R. Acad. Sci. Paris. T. 220, pp. 330-332.
- AUBERT (G.), SEGALEN (P.) - 1966 - Projet de classification des sols ferralli-
tiques. Cahiers ORSTOM, sér. Pédol., IV, 4, pp. 97-112 - Bibliogr. 46 réf.
- AUBREVILLE (A.) - 1949 - Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale
Soc. Ed. Geog. Maurit. Col. Paris, 351 p.
- AUBREVILLE (A.) - 1950 - Flore forestière soudano-guinéenne, A.O.F., A.E.F.
Soc. Ed. Geogr. Maurit. Col. Paris, 523 p.
- AUBREVILLE (A.) - 1962 - Savanisation tropicale et glaciations quaternaires.
Adansonia, Paris, 1962, II, I, pp. 16-84, 14 fig.
- AUDRY (P.) - 1965 - Résultats agronomiques relatifs à la campagne de coton sur
les sols rouges faiblement ferrallitiques de Deli. Col. OUA/STRC sur la
conservation et l'amélioration de la fertilité des sols. Khartoum, novembre,
1965.
- AUDRY (P.) - 1967 - Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferru-
gineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture (Arachide et
pénicillaire). Col. sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, novembre.
- AUDRY (P.), POISOT (P.) - 1966 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000
de la République du Tchad. Feuille NIELLIM, Centre ORSTOM, Fort-Lamy, ronéo.
- AUZEL (M.), CAILLEUX (A.) - 1949 - Silicification nord-saharienne. Bull. Soc.
Geol. Fr. 5, pp. 553-559.
- BACHELIER (G.) - 1959 - Etude pédologique des sols de Yaoundé (Cameroun). Contri-
bution à l'étude de la pédogénèse des sols ferrallitiques. Agronomie Tropicale,
mai-juin.
- BACHELIER (G.) - 1963 - La vie animale dans les sols. Publ. ORSTOM, In. - Doc. tech.
n° 3, Paris, 279 p.

- BALDENSPERGER (J.), STAIMESSE (J.P.), TOBIAS (CH.) - 1968 - Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal. Moyenne Casamance. Centre ORSTOM, Dakar, ronéo, 1 carte (couleurs).
- BASTISSE (E.M.) - 1949 - Essais sur le rôle de complexes colloïdaux en pédologie et en physiologie végétale. Paris.
- BASTISSE (E.M.) - 1967 - Dispersion du fer sous l'action de la silice agissant comme vecteur. C.R. Acad. Sci. Paris, n° 7, 13 février, t. 264, sér. D.
- BATTISTINI (R.) - 1964 - Etude géomorphologique de l'extrême sud de Madagascar Edition Cujas.
- BEAUDOU (A.) - 1970 - Sols rouges et beiges : étude d'une séquence sur quartzite en pays ferrallitique forestier (R.C.A.). Ronéo, Centre de Bangui, 49 p.
- BENOIT-JANIN (P.) - 1960 - Les sols formés sur les grès de Carnot. 3ème conf. Int. des sols, Dalaba, t. I, pp. 459-462.
- BERLIER (P.), DABIN (B.), LENEUF (N.) - 1956 - Comparaison physique, chimique et microbiologique entre les sols de forêt et de savane sur les sables tertiaires de la basse Côte d'Ivoire. VIème Congr. Sci. du Sol, Paris 1956. vol. 81.
- BERTHOIS (L.) - 1965 - Technique de l'analyse granulométrique. C.D.U. Paris.
- BETREMIEUX (R.) - 1951 - Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. Annal. Agron., n° 3, pp. 193-295.
- BILLY (G.) - 1954 - Etude des courbes normales de dispersions. Publ. Centre de Doc. Universitaire, Paris.
- BLOT (A.), PEDRO (G.) - 1967 - Etude des relations entre la composition granulométrique et la constitution minéralogique des sols et horizons d'altération. Ann. Agron. 18 (2), pp. 203-216.
- BOCQUIER (G.) - 1958 a - Observations pédologiques dans la région de la Bikouala-Mossaka. Ronéo I.E.C., Octobre, Brazzaville.
- BOCQUIER (G.) - 1958 b - Reconnaissance pédologique dans la région de l'Albima Lefini, ronéo, Centre ORSTOM, Brazzaville (Congo).
- BOCQUIER (G.) - 1967 - Introduction à quelques problèmes relatifs au lessivage dans les sols ferrugineux tropicaux. Ronéo, Col. pédol. ORSTOM, Paris, Octobre.

- BOCQUIER (G.), BARBERY (J.) - 1965 - Cartes pédologique de reconnaissance au 1/200.000 de la République du Tchad. Feuille Singako. ORSTOM, Fort-Lamy ronéo, 125 p., 15 pl.H.T. : 44 dossiers de caractérisation pédologique, 1 carte.
- BOCQUIER (G.), CLAISSE (A.) - 1963 - Reconnaissance pédologique des vallées de la Gambie et de la Koulountou (Sénégal). Ronéo Dakar-Hann, juin 1961, Cahiers ORSTOM Pédol. 4.
- BOCQUIER (G.), PAQUET (H.), MILLOT (G.) - 1970 - Un nouveau type d'accumulation oblique dans les paysages géochimiques : l'invasion remontante de la montmorillonite. C.R. Acad. Sci. Paris, 19 Janvier. T.270, sér. D, pp. 460-463.
- BONFILS (P.), CHARREAU (CL.), MARA - 1963 - Etudes lysimétriques au Sénégal. Résumés d'observations climatologiques dans la région de Bambey. Bull. Agron. n° 19 - IRATCV, années 1958/59. Annales du C.R.A. de Bambey (Sénégal) pp. 29-62.
- BONIFAS (Marthe) - 1958 - Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse présentée à la Fac. des Sci. de l'Univ. de Strasbourg. 370 p., Multigr., Bibliogr., 14 pl. 4 cartes.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.) - 1961 - Ferrallitic, Tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils. Revista da junta do ultramar, Vol. 9, n° 2.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), CASTANHO POVOAS (J.A.) - 1959 a - Ferrallitic, tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils. 3ème Conf. Interafr. des sols, Dalaba, Vol. I, pp. 318-319.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), CASTANHO POVOAS (J.A.) - 1959 b - pH base saturation relationships for ferrallitic, tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils of Southern, pp. 189-193.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.), CARDOSO FRANCO (E.P.), PINTO RICARDO (R.) - 1959 - Carte des sols du district de HUILLA (Angola). 3ème Conf. Interafr. des sols, Dalaba, Vol. I, pp. 439-442.
- BOTHELO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.) - 1960 - Generalized soil map of Angola 7th Interafr. Congr. of Soil Sci. Madison, Wisc. (U.S.A.), Vol. 8.
- BOTELHO DA COSTA (J.V.), CASTANHO POVOAS (J.A.) - 1961 - pH base saturation relationships for ferrallitic tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils of Southern Angola. Revista da junta do ultramar, vol. 9, n° 2.

- BOULAINE (J.)** - 1966 - Sur les facteurs climatiques de la genèse des sols rouges. Conf. sur sols méditer. Madrid, pp. 28-284.
- BOULET (R.)** - 1962 - Contribution à l'étude des sols ferrugineux tropicaux de Côte d'Ivoire. Rapport ronéo, ORSTOM, Abidjan.
- BOULET (R.), NAHON (D.)** - 1970 - C.R. d'une tournée dans la région de Port-Etienne (Mauritanie) du 4 au 14 mars. Ronéo, Centre ORSTOM, Dakar, 21 p.
- BOULVERT (Y.)** - 1966 - Reconnaissance pédologique dans l'Ouham. Contribution à l'étude du passage des sols beiges aux sols rouges. Rapport de stage. Centre ORSTOM, Bangui, 78 p., 1 plan de situation.
- BOULVERT (Y.)** - 1968 - Quelques aspects de l'influence de la topographie et du matériau originel sur la répartition des sols ferrallitiques, sols ferrugineux tropicaux, et vertisols dans la région de Bossangoa au nord-ouest de la République Centrafricaine. Cah. ORSTOM Péd. Vol. VI, n° 3/4, pp.259-275
- BOURGEAT (F.)** - 1970 - Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. Thèse Univ. de Strasbourg. ORSTOM, Tananarive.
- BOURGEAT (F.), HERVIEU (J.), RIQUIER (J.)** - 1956 - Présentation de quelques profils de sols ferrallitiques. Etude du milieu pédogénétique dans les environs de Tananarive. Colloque UNESCO, Madagascar.
- BOUTEYRE (G.)** - 1961/1963 - Etude pédologique de la région du Logone et du Moyen Chari entre Logone et Bahr-Sara-Moundou. Mission 1959, Koumra. Mission 1960. Rapport ronéo, ORSTOM, Centre de Fort-Lamy, 71 p. 6 graph. 1 carte, Bibliogr. (134 réf.).
- BOUTEYRE (G.), CABOT (J.), DRESCH (J.)** - 1964 - Observations sur les formations du Continental Terminal et du Quaternaire dans le Bassin du Logone (Tchad). Bull. Soc. Géol. de France (7) VI, pp. 23-27.
- BRABANT (P.)** - 1968 - Sols ferrugineux tropicaux et sols apparentés du nord Cameroun. Aspects de leur pédogénèse. Ronéo, Centre Yaoundé, ORSTOM.
- BRAMMER (M.)** - 1955 - Visit to Haute-Volta. Technical Report n° 9. Gold coast department of soil and land use survey, 50 p. Kumassi.

- BREWER (R.) - 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. JOHN WILEY AND SONS INC. 470 p.
- B.R.G.M. - Documents FED : études des puits en Casamance (non publié).
- BRINKMAN (R.) - 1969/1970 - Ferrolysis, a hydromorphic soil forming process, Géoderma, Amsterdam, pp. 199-206.
- BRUGIERE (J.M.) - 1960 - Etude pédologique de la cuvette congolaise. Rapport provisoire. Ronéo, I.E.C. décembre, Brazzaville.
- BUTZER (K.W.) - 1961 - Les changements climatiques dans les régions arides depuis le pliocène. Dans "Recherches sur la zone aride. Histoire de l'utilisation des terres des régions chaudes". UNESCO, pp. 35-64.
- CADILLAC (H.) - 1965 - Etude agropédologique de quelques dépressions rizicultivables de la région de Bignona. Ronéo, Centre ORSTOM de Dakar - Cartes.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) - 1961 - Préparation d'hydroxydes mixtes d'aluminium et de fer. C.R. Acad. Sci. pp. 213 - 288-290.
- CAILLEUX (A.), TRICARD (J.) - 1959 - Initiation à l'étude des sables et des galets.
- CARROLL (D.) - 1958 - Role of clay minerals in the transportation of iron. Geochimica & Cosmochimica Acta. Vol. 14, n° 1, 2 août.
- CARROLL (D.), JONAS (N.K.) - 1947 - Laterite developed on acid rocks in Southwestern Australia. Australia Soil Sci. Vol. 64, pp. 1-15.
- CHARREAU (C.), DOMMERGUES (Y.) - 1955 - Etude des sols de la station de Sotuba (Mali). Ronéo, Bureau des sols Dakar.
- CHARREAU (C.), CHAUVEL (A.) - 1969 - C.R. d'expérimentation sur cases lysimétriques. Ronéo, IRAT, Bambey. ORSTOM, Dakar.
- CHARREAU (C.), FAUCK (R.) - 1970 - Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (Casamance). L'Agronomie Tropicale, fév. Vol. XXV, n° 2, p. 151.
- CHATELIN (Y.) - 1969 - Contribution à l'étude de la séquence sols ferrallitiques rouges et ferrugineux tropicaux beiges. Examen de profils centrafricains. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol. VII, n° 4, pp. 447-492.

- CHAUVEL (A.) - 1966 - Etudes physiques des sols de Séfa. Centre ORSTOM, Dakar
Rap. Multigr. 56 p.
- CHAUVEL (A.) - 1970 - Organisation interne et granulométrie des sols rouges de
Casamance (comme élément d'interprétation de leur pédogénèse). A paraître.
- CHAUVEL (A.) - Thèse à paraître.
- CHAUVEL (A.), FAUCK (R.) - 1969 - Sur la mise en évidence et la caractérisation
d'un horizon B dit "de comportement" dans les sols rouges de Casamance
(Sénégal).C.R. Acad. Sci. Paris, t. 269, 24 nov., sér. D, pp.2080.
- CHAUVEL (A.), MONNIER (G.) - 1967 - Sur la signification générale de l'analyse
granulométrique en pédologie ; examen des problèmes posés par la caracté-
risation de la texture de certains sols tropicaux. C.R. Acad. Sci. Paris.
t. 264, pp. 1969-1972.
- CHAUVEL (A.), PEDRO (G.) - 1967 - Considération sur l'analyse granulométrique
et le problème de la détermination de la constitution minéralogique élé-
mentaire de certains sols tropicaux ; nécessité et limites de la déferrif-
cation.C.R. Acad. Sci. Paris, t. 264, pp. 2089-2092.
- CHAUVEL (A.), FAUCK (R.) - 1971 - A paraître.
- CLAISSE (G.) - 1968 - Etude expérimentale de l'analyse aux trois acides :
comportement du quartz pur à l'attaque triacide. Cah. ORSTOM, sér. Pédol.
Vol. VI, n° 2, pp. 129-150.
- COINTEPAS (J.P.) - 1956 - Premiers résultats des mesures de l'érosion en
moyenne Casamance. C.R. VIème Congr. Sci. Sol. Paris, vol. VI-15, pp. 569-
578.
- COINTEPAS (J.P.) - 1960 - Bilan des études chimiques et pédologiques entreprises
à la station expérimentale de Séfa (Sénégal). Ronéo, 107 p., Octobre.
- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.) - 1965 - Caractéristiques de quelques groupes
de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. Cah. ORSTOM
Pédol. Vol. III, Fasc.2, pp. 91-122.
- COMBEAU (A.) - 1951 - Rapport de prospection du triangle Fly-Davie-Assome;
I.R.T.O. Lomé (Togo).
- COMBEAU (A.) - 1954 - Les sols de la station de la Dibamba, I.R.H.O. (Cameroun)
Ronéo, Centre ORSTOM, Yaoundé, 8 p. 2 tabl.

- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) - 1963 - Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Sci. du Sol, n° 1, mai.
- CONRAD (G.) - 1968 - L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien Thèse Sci. Paris, ronéo, 768 p.
- CORRENS (G.W.) - 1961 - The experimental chemical weathering of silicates. Clay Min. Bull. 4, pp. 249-265.
- DABIN (B.) - 1956 - Contribution à l'étude de la fertilité des terres de Barre. Agronomie Tropicale, n° 4, juillet-août.
- DABIN (B.) - 1959 - Etude des sols sur sables quaternaires le long du Canal d'Assinie (Côte d'Ivoire). Ronéo, Centre ORSTOM, Adiopodoumé, Décembre.
- DABIN (B.) 1964 - Les sols jaunes ferrallitiques de la Côte d'Ivoire. 8th Int. Congr. Soil Sc. Bucharest, Romania, t. V, vol. 63, pp. 559-567.
- DABIN (B.) - 1966 - Application des dosages automatiques à l'analyse des sols, 2ème partie attaque triacide (aluminium, fer, titane) fer total et fer libre. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. IV - 1, pp. 77-103.
- DABIN (B.) 1967 - La matière organique dans les sols ferrugineux tropicaux. Ronéo, Réunion Pédol. ORSTOM.
- DABIN (B.), LENEUF (N.), RIOU (G.) - 1960 - Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2.000.000. Note explicative. Ronéo Secrét. d'Etat à l'Agriculture, Abidjan.
- DABIN (B.), THOMANN (CH.) - 1970 - Etude comparative de deux méthodes de fractionnement des composés humiques (Méthode TURIN et méthode électrophorétique) Sér. Initiations et Documents Techniques de l'ORSTOM, n° 16.
- DARS (D.) - 1961 - Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan Occidental (Afrique de l'Ouest). Mém. B.R.G.M., n° 12.
- DAVEAU - 1960 - Les plateaux du Sud-Ouest de la Haute-Volta. Travaux départ. Géogr. n° 7, Fac. lettres de Dakar.
- DAVIDTZ (J.C.), SOMNERME - 1965 - Blocked charges on clay minerals in subtropical soils. J. Soil - Sci. Vol. 16, pp. 270-274.

- DEB (B.C.) - 1950 - Estimation of free iron oxides in soil colloïdes. Proc. Soil Sci.Soc. Amer. 6, pp. 131-132.
- BOISSEZON (P. de) - 1961 - Reconnaissance pédologique autour de l'Huilerie d'Etoro (Sous Préf. de Gambouma). Rap. de terrain, ronéo I.E.C., Brazzaville, MC - 108, fév., 14 p.
- BOISSEZON (P. de) - 1963 - Les sols des plateaux de Djambala et Koukouya et de la zone avoisinante des hautes collines. Ronéo I.E.C. Brazzaville, mars.
- BOISSEZON (P. de) - 1965 - Les sols de savane des plateaux BATEKE. Cah. ORSTOM Pédol., vol. III, Fasc. 4, p.291.
- CONINCK (F. de), HERBILLON (A.) - 1969 - Evolution minéralogique et chimique des fractions argileuses dans des alfisols et des spodosols de la Campine (Belgique). Pédol. XIX, 2, pp.159-272, 25 Fig., 6 fotogr.
- DE CRAENE (A.), LARUELLE (J.) - 1955 - Genèse et altération des latosols équatoriaux et tropicaux humides. Bull. Afr. Congo-Belge, XLVI, pp. 1.113-1.243.
- DEFOSSEZ (M.) - 1963 - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la boucle du Niger. Thèse Sc. Strasbourg, 2 vol. Mém. n° 13 du B.R.G.M. Paris.
- DELIBRIAS (G.), HUGOT (H.J.), QUEZEL (P.) - 1957 - A propos de la datation par le radiocarbone de sédiments sahariens récents. Libyca, t. V, pp. 267-270.
- DELVIGNE (J.) - 1965 - Pédogénèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. Thèse, Mém. ORSTOM n° 13, Dunod, Paris.
- DEMOLON (A.), BASTISSE (E.M.) - 1935 - Sur la dispersion des colloïdes argileux, application à leur extraction. Ann. Agron.,nouvelles séries, t. 5, p.1.
- DEMOLON (A.), BASTISSE (E.M.) - 1938 - Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium et leur rôle dans les sols. Ann. Agron.,pp.1-28.
- DEMOLON (A.), BASTISSE (E.M.) - 1944 - Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. Annal. Agron.J.M.F.
- DESHPANDE (T.L.), GREENLAND (D.I.), QUIRK (J.P.) - 1964 - Rôle of iron oxides in the bonding of soil particles. Nature, London, 4 J. pp.64-201.

- DESHPANDE (T.L.), GREENLAND (D.J.), QUIRK (J.P.)** - 1968 - Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminium oxides. *J. of Soil Sci.*Oxford, mars, 19, 1, pp. 108-122.
- D'HOORE (J.)** - 1949 - Répertoire des méthodes opératoires d'analyses de sol de l'Institut National Agronomique du Congo Belge. Publié par le B.I.S.
- D'HOORE (J.)** - 1952 - Essai de classification des zone d'accumulation de sesquioxides libres sur des bases génétiques. Conf. Yangambi, décembre.
- D'HOORE (J.)** - 1954 - L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. INEAC. Sér. Scientifique, n° 62, p.132.
- D'HOORE (J.)** - 1964 - La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000. Mém.explicatif C.C.T.A., Lagos, 209 p.
- D'HOORE (J.), FRIPIAT (J.J.), GASTUCHE (M.C.)** - 1954 - Les argiles tropicales et leur oxyde de fer de recouvrement. C.R. 2ème Conf. Interafr. des sols. Léopoldville, août. Vol.I, Doc.13, pp. 257-250.
- DIDIER de SAINT AMAND (R.)** - 1969 - Le Continental terminal et son influence sur la formation des sols au Niger. Cah. CRSTOM sér. Pédol. Vol. VII, n° 4 pp. 561-582.
- DIENG (M.)** - 1963 - Etude géologique du Continental terminal du Sénégal Oriental. B.R.G.M., Dakar, 23 p.
- DIJKERMAN (J.C.), CLINE (M.G.), OLSON (G.W.)** - 1967 - Properties and genesis of textural subsoil lamellae. *Soil Sci*, Baltimore, Juillet, pp.104-1-7-16.
- DOEGLAS (J.)** - 1958 - L'interprétation des résultats d'analyses mécaniques. *J. Sédim. Pétrol.* vol., 16, n° 1, pp.19-40.
- DOMMERGUES (Y.)** - 1959 - Caractéristiques biologiques de quelques grands types de sols de l'Ouest Africain. Ronéo, Dakar Hann. 3ème conf. Interafr. des sols, Dalaba, Vol. I, pp. 215-220.
- DOMMERGUES (Y.)** - 1963 - Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Bois et Forêts des Tropiques*, 87, janv.fév. pp. 9 - 25.
- DOMMERGUES (Y.)** - 1969 - La biologie des sols : Que sais-je. n° 399.

- DOMMERMUES (Y.), DUCHAUFOR (PH.) - 1965 - Etude comparative de la dégradation biologique des complexes organo-ferrugineux dans quelques types de sols. Sci. du sol, vol. I, pp. 43-59.
- DOMMERMUES (Y.), MANGENOT (F.) - 1969 - Ecologie microbienne du sol. Masson & Cie Paris. 796 p. 180 Fig., 101 tabl.
- DUBOIS (J.) - 1949 - Esquisse des différents types de sols de la moitié sud du Sénégal. Bull. Agron. Congo Belge, n° 1, pp. 575-617.
- DUCHAUFOR (PH.) - 1954 - Essai de fractionnement de différents complexes humiques dans les sols. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 238, pp. 836-838.
- DUCHAUFOR (PH.) - 1960/1965 - Précis de pédologie 1er et 2ème édition Masson, Paris, 481 p.
- DUCHAUFOR (PH.) - 1964 - Evolution de l'aluminium et du fer complexés par la matière organique dans certains sols. Sci. Sol, n° 2, pp. 3-17.
- DUCHAUFOR (PH.) - 1967 - La podzolisation en climat atlantique. An de Edafologia y Agrobiologia, Madrid n° spécial, pp. 1-15.
- DUCHAUFOR (PH.) - 1968 - L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. Masson & Cie.
- DUCHAUFOR (PH.), DOMMERMUES (Y.) - 1963 - Etude des composés humiques de quelques sols tropicaux et subtropicaux. Sols. Afric., vol. VIII, pp. 5-23.
- DUCHAUFOR (PH.), JACQUIN (F.) - 1966 - Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. Bull. Ec. Nat. Sup. Agron. Nancy, t. VIII, Fasc. I.
- DUCHAUFOR (PH.), LELONG (F.) - 1967 - Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux de sols lessivés. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 264, pp. 2884-2887.
- DUCHAUFOR (PH.), SOUCHIER (B.) - 1966 - Note sur une méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libre dans les sols. Sci. du sol, 1, pp. 17-30.
- DUDAL (R.) - 1961 - Report on a soil correlation study made in North Togoland, North Dahomey, Upper Volta and Sénégal. Ronéo non publié, décembre.

- DUGAIN (F.) - 1961 - Les méthodes d'analyses effectuées au laboratoire de physico-chimie des sols. Centre ORSTOM de Dakar, ronéo.
- EDWARDS (A.P.), BREMER (J.M.) - 1962 - Microaggregates in soils. J. Soil Sci. Oxford, mars, 18,1, pp. 64-73.
- ELOUARD (P.) - 1959 - Etude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guelba mauritanien et de la vallée du Sénégal. Thèse, Paris. Mém. B.R.G.M. n° 7.
- ELOUARD (P.) - MILLOT (G.) - 1959 - Observations sur les silicifications du lutétien en Mauritanie et dans la vallée du Sénégal.
- ERHART (H.) - 1956 - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et rhexistasie. Masson et Cie, Editeurs, Paris. 90 p.
- ERHART (H.) - 1956 - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson & Cie, Editeurs, Paris, collection : Evolution des Sciences.
- FAUCK (R.) - 1954 - Les facteurs et les intensités de l'érosion en Moyenne-Casamance. Cong. Int. Sci. Sol, Léopoldville, 5, comm. V, vol. III, VI, 4, pp. 376-379.
- FAUCK (R.) - 1955 - Etude pédologique de la région de Sedhiou. Agronomie Tropicale nov., n° 6, pp. 752-793.
- FAUCK (R.) - 1956 - Erosion et mécanisation agricole. Publication du Bureau des sols de l'A.O.F., sept., 24 p., 12 pH.
- FAUCK (R.) - 1956 - Evolution des sols sous culture mécanisée dans les régions tropicales. Congr. int. Sci. Sol. 6, Paris, vol. E, pp. 593-596.
- FAUCK (R.) - 1956 - L'étude de l'évolution des sols sous culture mécanisée et le problème des prélèvements de terre. Bull. A.F.E.S., 73, pp. 388-391.
- FAUCK (R.) - 1960 - Rapport de pédologie n° 6 de la Mission d'Etudes au Dahomey. Reconnaissance pédologique de la région ATHIEME - LOKOSSA - AGAME. ORSTOM Centre de Cotonou, août, ronéo 9 p., 1 pl., 1 carte h.t.
- FAUCK (R.) - 1961 a- Rapport n° 8 de la Mission d'Etudes au Dahomey. Etude des sols de la région d'AGONVY (Terres de barre du Sud-Est du Dahomey) 1ère partie : Les sols et leur utilisation. ORSTOM, Centre de Cotonou, janvier, ronéo, 72 p., 23 tabl., 3 graph., 2 cartes.

- FAUCK (R.) - 1961 b - Rapport n° 9 de la Mission d'Etudes au Dahomey, Sud-Est, 2ème partie : la pédogénèse. ORSTOM, Centre de Cotonou, janvier, ronéo, 49 p. 9 tabl., 11 graph., Bibl. (31 réf.).
- FAUCK (R.) - 1963 - Le sous-groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions. Sols. Afr., vol. VIII, n° 3, pp. 338-405.
- FAUCK (R.) - 1964 - Les sols rouges faiblement ferrallitiques d'Afrique Occidentale. Communication 8ème Congr. Inter. Sci. du Sol. Bucarest, août, V. 62, pp. 547-557.
- FAUCK (R.) - 1970 - Evolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale. C.R. Acad. Sci. Paris, T. 271 n° 25, pp. 2273-2276.
- FAUCK (R.), DELAUNE (Mme.) - 1971 - A paraître.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (Cl.), THOMANN (Ch.) - 1967 - Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. C.R. Hebd. Séances Acad. Agricul. Fr. 31 mai, n° 9, pp. 698-703
- FAUCK (R.), MOUREAUX (Cl.), THOMANN (Ch.) - 1969 - Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. L'Agronomie Tropicale, mars, vol. XXIV, n° 3, pp. 263-301.
- FAUCK (R.), TURENNE (J.F.), VIZIER (J.F.) - 1963 - Etude pédologique de la Haute-Casamance : 1 rapport général. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 181 p. ronéo, Tabl. analy. Bibl. (29 réf.). Ministère de l'Economie Rurale et de la Coopération, République du Sénégal.
- FAURE (H.) - 1966 - Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène, ds Quaternaria, VIII, Roma, pp. 167-175.
- FIEDES (M.) - 1952 - Relation of colloidal hydroxydes to high cations exchange capacity, Soil Science.
- FIEDES (M.), SWINDALE (L.D.) - 1954 - Chemical weathering of silicates in soil formation. New Zealand. Inst. Sci. Techn. 36 b, pp. 140-154.
- FIEDES (M.), PECROTT (K.W.) - 1966 - The nature of allophane in soils. Part 3 - rapid field and laboratory test for allophane. New Zealand Journal of Science, vol. 9, n° 3, septembre.

- FOLLETT (E.A.C.) - 1965 - The retention of amorphous, colloidal ferric³⁴⁰ hydroxyde by kaolinites. J. Soil Sci. Vol. 16, n° 2, pp. 334-341.
- FORDHAM (A.W.) - 1970 - Sorption and precipitation of iron and kaolinite Austr. J. Soil. Res. pp. 107-122.
- FRIEDLAND (V.M.), TSYURUPA (I.G.), ANDREYEVA (N.A.) - 1966 - Cation exchange capacity or from oxides and its role in the exchange capacity of soils. Soviet Soil Science, Doklady 13.
- FRIPIAT (J.J.), GASTUCHE (M.C.) - 1952 - Etudes physico-chimiques des surfaces des argiles. Les combinaisons de la kaolinite avec les oxydes de fer trivalent. Publ. I.N.E.A.C., n° 54, 60 p.
- FRIPIAT (J.J.), GASTUCHE (M.C.), COUVREUR (J.) - 1953 - Quelques caractéristiques thermiques des complexes synthétiques kaolinite-oxyde de fer trivalent. Bull. Acad. Sci. Roy. Belgique, 39 p.
- FURON (R.) - 1960 - Géologie de l'Afrique. Payot, Paris, 400 p.
- GARRELS (R.M.), CHRIST (C.L.) - 1957 - Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Traduit par WOLLAST (R.). Monogr. de chimie minérale. Gauthier-Villars. Paris, 325 p.
- GASTUCHE (M.C.) - 1953 - Les combinaisons de la kaolinite avec les oxydes de fer trivalent. Pédologie. 3, pp. 21-29.
- GASTUCHE (M.C.) - 1959 - Etude de l'altération de la kaolinite par divers agents chimiques. Silic. Indust. Tome XXIV n° 5-6, pp. 237-244 - pp. 313-319.
- GASTUCHE (M.C.), DELVIGNE (J.), FRIPIAT (J.J.) - 1954 - Altération chimique des kaolinites. Vème Congr. Int. Sci. Sol. 2, pp. 439-449.
- GAVAUD (M.) - 1970 - Projet de corrélation pédologique dans le bassin du lac Tchad. ORSTOM, contribution à la connaissance du bassin tchadien.
- GAVAUD (M.), BOULET (R.) - 1966 - Rapport sur la carte au 1/500.000 Niger Occidental. Ronéo Centre ORSTOM Dakar.
- GERASIMOV (I.P.), ROMASHKEVICH (A.I.) - 1967 - Soil and weathering crust in genetic profiles of West Georgian red earths. Soviet Soil Science n° 4, P.442.
- GLANGEAUD (L.) - 1941 - Evolution des minéraux résiduels et notamment du quartz dans les sols autochtones en Afrique Occidentale. C.R. Acad. Sci. Paris tome 22, pp. 862-864.

GOLDMAN (M.I.), TRACEY (J.I.) - 1946 - Relations of bauxite and kaolinite in the Arkansas bauxite deposits. Geol., 41, pp. 567-575.

GO OKAMOTO, TALEKHI OKURA (T.), KATSUMI GOTO - 1957 - Properties of Silica in water. Geochimica et Cosmochimica Acta, n° 12, pp. 123-132

GOUZES (R.) - 1961 - Etude hydrogéologique de la Casamance. B.R.G.M. Dakar 46 p, 9 pl.

GREENLAND (D.J.), OADES (J.M.), SHERWIN (T.W.) - 1968 - Electron-microscope observations of iron oxides in some red soils. J. of soil Sci. Oxford, mars 1968, 19, 1, pp. 123-126.

GUICHARD (E.) - 1966 a - Étude pédologique du Val de Jaguaribe (Brésil) Rapport ronéo provisoire.

GUICHARD (E.) - 1966 b - Note préparatoire sur une tournée et la photo-interprétation de la région de Bobo-Dioulasso - Banfora - Bama (Haute-Volta). Ronéo, Centre ORSTOM, Dakar.

GUICHARD (E.), POISOT (P.) - 1964 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000. Feuille de MELFI (Tchad), n° 19, ORSTOM, Fort-Lamy.

GUILCHER (A.) - 1959 - La région cotière du Bas-Dahomey Occidental. Etude de géographie physique et humaine appliquée. Bull. de l'IFAN tome XXI, série B, n° 3-4.

HALLSWORTH (E.G.) - 1965 - The relationship between experimental pédology and soil classification in experimental pedology.

HARDY (F.), et RODRIGUES (G.) - 1939 - Soil genesis from andesite in Grenada British West Indies. Soil Sci. 48, pp. 361-384.

DE HEINZELEIN (J.) - 1952 - Sols paléosols et désertifications anciennes dans le secteur Nord-Oriental du bassin du Congo. Public. I.N.E.A.C. Bruxelles, 168 p.

HENIN (S.T.) - 1967 - Interprétation de l'analyse granulométrique. Le concept de texture. Annales de Edafologia y agrobiologia, Madrid, pp. 845-848.

HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.) - 1969 - Le profil cultural. 2ème édition 332 p. Masson et Cie Editeurs.

- HERBILLON (A.J.), TRAN VINH AN (J.) - 1954 - Etude de la fraction amorphe colloïdale de quelques sols tropicaux. 8th. Int. Congr. Sci. Sol. Bucharest Romania, vol. III - VII - 13, pp. 1191-1201.
- HERBILLON (A.J.), FRANKART (R.), VIELVOYE (L.) - 1966 - Evolution des fractions argileuses dans une toposéquence du Burundi. Comparaison avec les caractères morphologiques des horizons B. Pédologie, Gand, n° 2, pp. 167-182.
- HERBILLON (A.J.), PECROT (A.), VIELVOYE (L.) - 1966 - Aperçu sur la minéralogie des fractions fines de quelques grands groupes de sols du Vietnam - Pédologie, Gand, XVI - 1, pp. 5-16.
- HERVIEU (J.) - 1959 - Les sables roux du sud de Madagascar. 3ème conférence Interfr. des sols, Dalaba, Vol. I, pp. 233-243.
- HERVIEU (J.) - 1960 - Notice carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000 Madagascar. Feuille n° 33. BRICKAVILLE-MORAMANGA, Public. I.R.S.M. Tananarive.
- HERVIEU (J.) - 1966 - Thèse. Contribution à l'étude de l'alluvionnement au milieu tropical. ORSTOM, Paris - 521 p.
- HERVIEU (J.) - 1967 - Géographie des sols malgaches. Cah. ORSTOM, série Pédol. Vol. V, fasc. 1, pp. 39-82, 6 fig., bibliogr.
- HERVIEU (J.) - 1969 - Découverte de la pebble culture au Nord de l'Adamaoua (Cameroun). Indidences géomorphologiques et pédogénétiques. C.R. Acad. Sci. Paris, tome 258, série D, n° 19.
- HIGGINS (G.M.) - 1965 - Pedological Factors in Nigerian soils.
P.I. : The factors
P.II : The influence of pedological factors on soils group
P.III : An attempted forecast of response zone
2ème conférence FAO, Fertilité des sols, Dakar, Janvier.
- HIGGINS (G.M.), TOMLINSON (P.R.) - 1961 - Soils of the western climatic Middle Belt in Northern Nigeria. 4th meeting of C.R.O.A.C.U.S., Samaru, Novembre.
- HILL (I.D.) - 1968 - La classification de quelques sols de la Gambie. Roué, réunion pédologique ORSTOM, Septembre, Bondy.

- HILL (I.D.) - 1969 - Notes on the soils of Western Division the Gambia-Land. Resour. Div. Dir. Overseas Surv. Unpub. Prov. Rep. PR/9/68.
- HILL (I.D.) - 1970 - Quantitative micromorphological evidence of clay movement. Technical Monograph. n° 2. Agricultural Research. Council, Soil Sciences.
- HUBERT (H.) - 1920 - Le dessèchement progressif en Afrique Occidentale. Bull. Com. Etud. Hist. Sci. A.O.F., pp. 401-467.
- HUMBEL (F.X.) - 1963 - Contribution à l'étude des sols sur Continental terminal en basse Côte d'Ivoire. Adiopodoumé. 125 p., 26 pl., 2 cartes de situation 4 tabl.
- HUMBEL (F.X.) - 1964 - Etude pédologique des dépressions fermées circulaires sur les plateaux de sables argileux en Basse Côte d'Ivoire. Ronéo, Abidjan, 75 p.
- JACQUIN (F.) - 1963 - Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Faculté des Sciences de Nancy.
- JEFFRIES (C.) - 1946 - A rapid method for removal of free iron oxides. Proc. Soil. sci. Soc. Amer. 11 - 211 - 2.
- JENNY (F.) - 1963 - Etude agro-pédologique des stations de Saria et de Farako Ba (H.V.) 1963-1964 - I Saria, II Farako-Ba, 29 p. ronéo, 1 carte des sols.
- JONQUET (P.) - 1963 - Remarques sur les formations sédimentaires Ouest Voltaïques. Janvier, B.R.G.M. ronéo + cartes.
- JUNG (G.), BRUCKERT (S.), DOMMARGUES (Y.) - 1968 - Etude comparée de diverses substances hydrosolubles extraites de quelques litières tropicales et tempérées. Oecol. Plant. Gauthier-Villars III, pp. 237-250.
- KILIAN (C.) - 1931 - Des principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. somm, S.G.F. p. 110.
- KOFFI (O.), WILLAIME (P.) - 1963 - Carte des sols de la station de NILOULI au 1/5.000. Notice explicative, ORSTOM, mission d'étude Dahomey, Cotonou.
- KOKONOVA (M.M.), ALEKSANDROVA (I.V.), TITOVA (N.A.) - 1964 - Decomposition of silicate by organic substances. Sov. Soil, sci. 10, p. 1005.

- KOVALEV (V.A.), GENERALOVA (V.A.) - 1967 - Interaction of humic and fulvic acids with iron in peat soils, Soviet Soil Sci. 9, pp. 1261-1268.
- KRAUSKOPF (K.B.) - 1959 - The geochemistry of silica in sedimentary environments. Soc. Econ. Pal. Miner. Publ., 7, pp. 4-19.
- KULBICKI (G.) - 1957 - Constitution et genèse des sédiments argileux sidérolithiques et lacustres du Nord et du Nord-Est de l'Aquitaine. Sci. Terre. Tome IV, n° 1-2, pp. 5-101.
- KAZUTAKE KYUMA, ANWAR HUSSAIN, KZIZABURO KAWAGUCHI - 1969 - The nature of inorganic matter in soil organo-mineral complexes. Soil Science and Plant Nutrition. Vol. 15, n° 4, p. 149.
- KELLERMAN (V.V.), TSYURUPA (Y.G.) - 1966 - Role of iron and organic matter in the aggregation of a soil's clay components. Soviet Soil Science, juillet 1966, pp. 940-947.
- KRAUSKOPF (K.B.) - 1959 - The geochemistry of silica in sedimentary environments. Soc. Econ. Pal. Miner. Sped. Publ. 7, pp. 4-19.
- KRUMBEIN (W.C.) - 1936 - The use of quartile measures in describing and comparing sediments. Amer Journal of Sci. vol. 37, pp. 99-111.
- KUBIENA (W.L.) - 1956 - Rubefaction et laterisation. 6ème Congrès Science du Sol, Paris.
- LAFOND (R.) - 1965 - Cycle cristallographique des kaolinites au cours des phénomènes superficiels en zone intertropicale. C.R. Acad. Sci. Paris, 260, pp. 5320-5332.
- LAJOINIE (J.P.) - 1960 - Observations sur le primaire de la région de Bobo-Dioulasso (H.V.). Bull. soc. Geol. France, 7ème série E 17, pp. 208-212.
- LAMOUREUX (M.) - 1962 et 1964 - Carte des sols du TOGO. Notices explicatives Ronéo IRTO, Lomé, 1962 et 8ème Congrès Science du sol 1964.
- LAMOUREUX (M.) - 1968 - Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement humiques du Liban. Cah. ORSTOM, série Pédol. Vol. VI, n° 1, pp. 63-94.

- LAMOUREUX (M.), SEGALEN (P.) - 1969 - Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. Science du Sol n° 1, pp. 63-75.
- LAPLANTE (A.) - 1954 - Les sols rouges lateritiques formés sur les basaltes anciens au Cameroun. Conf. Interafr. sols. Léopoldville, août 1954 - V - 27.
- LAPLANTE (A.), BACHELIER (G.) - 1953 - Introduction à la pédologie de l'Adamaoua. Etude détaillée dans le secteur de N'Gaoundere. IRCAM - 1953- 40 p. multigr. 1 carte 1/25.000.
- LAPPARENT (J.de) - 1939 - L'altération latéritique du granite de la région de Macenta (Guinée française). C.R. Acad. Sci. Paris, 208, pp. 1767-1769.
- LAUNAY (J.), WACKERMANN (J.M.) - 1964 - Etudes granulométriques et morphoscopiques de prélèvements de sols de Casamance (rapport inédit) Centre ORSTOM de Dakar.
- LEAL SILVA (J.N.), SEGALEN (P.) - 1968 - Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à hydroxydes. Ronéo S.S.C. Bondy, 29 p. Bibliogr. 3 graphiques.
- LELONG (F.) - 1964 - Etude minéralogique d'un profil d'altération sur roche granitique en Guyane Française. Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, 17, 4, pp. 263-286, Strasbourg.
- LELONG (F.) - 1967 - Note préliminaire sur les formations de Guyane Française : "manière d'être" de la kaolinite et de la gibbsite ; origine des phylites micacées. C.R. Acad. Sci. 264, pp. 2713-2716.
- LELONG (F.) - 1968 - Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane Française). Thèse Sciences Nancy. Ronéo 182 p.
- LENEUF (N.) - 1959 - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse Doct. Etat. Imprimé ORSTOM, 210 p.

- LENEUF (N.) - 1966 - Le processus de lessivage dans les sols ferrallitiques.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV, fasc. 4, pp. 25-27, Bibliogr. (2 réf.)
- LENFUF (N.), AUBERT (G.) - 1960 - Essai d'évaluation de la vitesse de ferrallitisation. 7th Inter. Congress. of Soil Science. Madison Wisc. U.S.A. V 31, vol. IV.
- LENEUF (N.), RIOU (G.) - 1963 - Sols jaunes et sols rouges de Côte d'Ivoire.
Colloque Léopoldville, Juin. Sols Africains, Vol. VIII, n° 3, septembre pp. 439-462.
- LEPRUN (J.C.) - 1967 - Les sols de la région de Goudiry (Sénégal Oriental).
Rapport de stage, centre Dakar-Hann, 133 p. 9 p. Bibliogr. 30 pl.
1 carte situation, 1 esquisse Pédol.
- LEPRUN (J.C.) - 1968 - Etude pédologique de la Haute-Volta. Région : Sourou.
Rapport préliminaire. 12 p. ronéo, 1 carte au 1/500,000
- LEPRUN (J.C.), MOREAU (R.) - 1969 - Etude pédologique de la Haute-Volta.
Région Ouest-Nord, Ronéo, centre ORSTOM de Dakar, 338 p. 1 carte au 1/500.000.
- LEVASHKEVICH (G.A.) - 1966 - Interaction of humic acids with iron and aluminium hydroxides, Soviet Soil Sci., 4, pp. 422-427.
- LEVEQUE (A.) - 1966 - Etude des principaux critères de la classification des sols ferrallitiques de Guyane Française. Fasc. Cahiers ORSTOM, sér. Pédol., vol. IV, pp. 61-74, bibliogr. (8 réf.).
- LEVEQUE (A.) - 1967 - Les sols ferrallitiques de Guyane Française. Mémoire ORSTOM n° 3, 168 p.
- LEVEQUE (A.) - 1969 - Le problème des sols à nappes de gravats. Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. VII n° 1, pp. 43-70.
- LHOTE (H.) - 1960 - Peintures préhistoriques du Sahara. Mission H. LHOTE au Tassili. Les Presses Artistiques.
- LOSSAINT (P.) - 1956 - Etude comparative de la solubilisation des oxydes de fer d'un sol par les extraits argileux stériles de lilières forestières.
C.R. Acad. Sci. 242 pp. 1052-1054.

- LOSSAINT (P.) - 1959 - Etude expérimentale de la mobilisation du fer dans des sols sous l'influence des litières forestières. Thèse Fac. des Sci. Strasbourg.
- LUCAS (J.), CAMEZ (T.), MILLOT (G.) - 1959 - Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor. 12, pp. 21-33.
- MAIGNIEN (R.) - 1956 - Les sols des points d'essais IRHO au Sénégal. Ronéo Centre ORSTOM, Dakar-Hann. 40 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1958 - Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique Occidentale. Thèse, Strasbourg, Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor.
- MAIGNIEN (R.) - 1959 - Les sols à arachides du Laghem Oriental. Ronéo Dakar-Hann, mai.
- MAIGNIEN (R.) - 1960 a - Les sols de Gambie. Ronéo, Dakar-Hann.
- MAIGNIEN (R.) - 1960 b - Influences anciennes sur la morphologie, l'évolution et la répartition des sols en Afrique Tropicale de l'Ouest. 7th Intern. Congr. of Soil Science, Madison, Vol. IV, V 24, pp. 171-175.
- MAIGNIEN (R.) - 1962 - Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques dans les régions sud-ouest du Sénégal. Rapport ronéo Dakar-Hann, juillet 1961. Sols Africains, Vol. VI, n° 3-4.
- MAIGNIEN (R.) - 1965 - Carte pédologique du SENEGAL au un million. Notice explicative n° 24. ORSTOM, Paris, une carte (couleurs), 63 p.
- MAIGNIEN (R.) - 1968 - Les sols ferrugineux tropicaux. Unités pédogénétiques. ORSTOM, Yaoundé, multigr. 34 p.
- MAIGNIEN (R.), BOCQUIER (G.) - 1961 - Rapport de tournées en Haute-Volta, Niger et Côte d'Ivoire - Ronéo Centre de Pédologie de Dakar-Hann, 29 p.
- MARIUS (C.) - 1962 - Evolution des sols sous culture dans les fermes cotonnières du Tchad. Campagne agricole 1961-1962. ORSTOM, Fort-Lamy, 154 p. ronéo, tabl. graph.

- MARIUS (G.) - 1964 - Notice explicative n° 17. Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000. Feuille de DAGELA, Tchad ORSTOM, Paris.
- MARIUS (G.), BARBERY (J.) - 1964 - Notice explicative n° 18. Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/300.000. Feuille de Moussafoyo, Tchad. ORSTOM, Paris.
- MARTIN (D.) - 1966 - Etudes pédologiques dans le Centre Cameroun Nanga-Eboko à Bertoua. Mémoire ORSTOM n° 19 Paris.
- MARTIN (D.) - 1967 - Importance de l'hydromorphie superficielle dans certains sols intertropicaux d'Afrique. Ronéo centre ORSTOM, Libreville.
- MARTIN (D.), SEGALEN (P.) - 1964 - Les sols du Cameroun Occidental. 8 th. Congress of Soil Science Bucharest Romania V - Vol. 16, pp. 133-144.
- MARTIN (D.), SEGALEN (P.) - 1966 - Notice explicative carte pédologique du CAMEROUN ORIENTAL au 1/1.000.000. Bull. ORSTOM n° 26, Paris.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.) - 1966 - Le département de Mungo, Ouest Cameroun. Etude des sols et leur utilisation. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV n° 2, pp. 27-50.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.), VALLERIE (M.) - 1966 - Les sols rouges du Nord Cameroun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV, fasc. 3, pp. 3-28, 8 fig. 4 fotogr., 6 tabl. Bibliogr. (47 réf.).
- MICHEL (P.) - 1959 - L'évolution géomorphologique des bassins du Sénégal et de la Haute-Volta Gambie. Ses rapports avec la prospection minière. Arch. B.R.G.M. Revue de Géomorph. Dynamique, tome 10 n° 5-12, pp. 117-143, 6 fig., rés. analy.
- MICHEL (P.) - 1960 - Recherches géomorphologiques en Casamance et en Gambie Méridionale. B.R.G.M. Dakar, 67 p., fotogr., annexes.
- MICHEL (P.) - 1964 - Le Quaternaire dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Bull. de l'Asequa n° 3, juillet, pp. 19-21 et Bull. Inst. Fr. Afr. Noire, A, Sénégal, t. 28 (1966) n° 1, pp. 416-420, 1 fig.

- MICHEL (P.) - 1967 et 1969 - Les grandes étapes de la morphogénèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie pendant le Quaternaire. Comm. VIème Congrès Panafricain de Préhistoire et de l'Etude du Quaternaire. Bull. Inst. Fond. Afr. Noire, A, Sénégal, t. 31, n° 2, pp. 293-324.
- MICHEL (P.) - 1970 a - "Les Bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique". Thèse Sci. Strasbourg, multigr. 737 p. 3 tomes, 1169 p. Bibliogr. (838 réf.), cartes.
- MICHEL (P.) - 1970 b - Chronologie du quaternaire des bassins du fleuve Sénégal et Gambie. Essai de synthèse. Bull. de l'Asequa n° 25 et 26.
- MICHEL (P.), ELOUARD (P.) FAURE (H.) - 1967 - Nouvelles recherches sur le quaternaire récent de la région de St-Louis (Sénégal) - Rapport n° 17 Laboratoire de Géologie, Faculté des Sciences de l'Université de Dakar
- MILLER (R.W.) - 1967 - Soluble silica in soil. Soil Science Proceedings, janvier-février 1967, 31 n° 1, pp. 46-50.
- MILLETTE (G.), VIEILLEFON (J.) - 1967 - Etudes pédohydrologiques au Togo. Publication FAO/ORSTOM.
- MILLOT (G.) - 1960 - Silice, silex, silicifications et croissance des cristaux. Bull. Serv. Carte géol. Als.-Lor. t. 13, fasc. 4, pp. 129-146. Strasbourg.
- MILLOT (G.) - 1961 - Silicifications et néoformations argileuses : problèmes de genèse. Coll. Intern. C.N.R.S. Paris, 105, pp. 167-173.
- MILLOT (G.) - 1964 - Géologie des argiles. Masson et Cie. Ed. 499 p.
- MILLOT (G.) - 1967 - Les deux grandes voies de l'évolution des silicates à la surface de l'écorce terrestre. Rev. Questions Scientifiques, t. 138, 15ème série, t. 28, n° 3.
- MILLOT (G.), BONIFAS (M.) - 1955 - Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et de bauxitisation. Bull. Serv. Carte Géol. Als.-Lor. VIII, pp. 1-20.
- MILLOT (G.), FAUCK (R.) - 1970 - Sur l'origine de la silice des silicifications climatiques et des diatomites quaternaires du Sahara. C.R. Acad. Sci.

- MILLOT (G.), PERRIAUX (J.), LUCAS (J.) - 1961 - Significations climatiques de la couleur rouge des grès permo-triasiques des Vosges et des grandes séries détritiques rouges. Bull. Serv. Carte Géol. Als Lor. 14, pp. 91-101.
- MILLOT (G.), RADIER (H.), MULLER-FUEGA (R.), DEFOSSEZ (M.), WEY (R.) - 1959 - Sur la géochimie de la silice et des silicifications sahariennes. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor. 12, fasc. 2, pp. 3-11.
- MITCHELL (B.P.), FARMER (V.C.), MAC HARDY (N.J.) - 1964 - Amorphous in organic materials in soil. Ann. Agron. 16, pp. 327-373.
- MONNIER (G.) - 1967 - Sur la couleur des terres considérées comme une caractérisation texturale. C.R. Acad. Sci. mai, série D 264, 18, pp. 2188-2191.
- MOREAU (R.) - 1966 - Les sols de la région nord de Banfora (Hte-Volta). Ronéo Dakar-Hann, 124 pages, Bibliogr., documents annexes.
- MOUREAUX (Cl.) - 1956 - Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000, feuille 19, MAEVATANANA. Imp. Mém. I.S.M., série D, tome VII, Tananarive.
- MOUREAUX (Cl.) - 1967 - Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest africains. Cah. ORSTOM, serv. Pédol., Vol. V n° 4, pp. 393-420.
- MULLER-FUEGA (R.) - 1954 - Contribution à l'étude de la géologie, de la pétrographie et des ressources hydrauliques et minérales du Fezzan. Mém. Ann. Min. et Géol. Tunisie 12.
- NGUYEN KHA, DUCHAUFOUR (PH.) - 1969 - Etat du fer dans les sols hydromorphes. Science du sol n° 1, pp. 97-110.
- NYE (P.H.) - 1955 - Some soil forming processes in the humid tropics II. The development of the upper slope member of the catena. Journal of Soil Science, vol. 6, n° 1, pp. 51-83.
- NYE (P.H.), GREENLAND (D.J.) - 1964 - Changes in the soil after clearing tropical forest. Plant and Soil 21 (1), août, pp. 101-112.

- OCBS (R.) - 1958 - Rapport de tournée dans les palmeraies d'Abomey et Athieme. Rapport ronéo IRHO Pobé.
- OCBS (R.), OLIVIN - 1960 - Prospection pédologique d'une région située au nord d'Agonvy, IRHO, ronéo Pobé, (Dahomey).
- PALAUZI (G.) - 1959 - Contribution à l'étude géologique et hydrologique des formations primaires du Soudan et en Haute-Volta. Bull. Serv. Géol. Prosp. Mém. Dakar, 33, 209 p.
- PAQUET (H.) - 1969 - "Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées". Thèse Sci. Strasbourg, multigr., 348 p.
- PEDRO (G.) - 1964 - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Ann. Agron. 1ère partie : n° 2, Vol. 15, 2ème partie : n° 3, Vol. 15.
- PEDRO (G.) - 1966 - Intérêt géochimique et signification minéralogique du paramètre moléculaire $K_i = \frac{S}{AL_{03}} \cdot 102$ dans l'étude des latérites et bauxites. Bull. Groupe Français des argiles. Tome XVIII, Fasc. 13.
- PEDRO (G.) - 1968 - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn. 10, pp. 457-470.
- PEDRO (G.), BERRIERE (J.) - 1966 - Sur l'altération expérimentale de la kaolinite et sa transformation en boehmite par lessivage à l'eau. C.R. Acad. Sci. Paris, tome 262 14/2/66, série D, pp. 729-732.
- PEDRO (G.), LUBIN (J.C.) - 1968 - Etudes sur l'évolution géochimique de gels aluminosiliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en conditions de libre drainage. Ann. Agron. Vol. 19, n° 3, pp. 293-348.
- PELISSIER (P.) - 1963 - Les pays du Bas-Ouémé. Une région témoin du Dahomey Méridional. Travaux du département de géographie n° 10. Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Dakar, 173 p.
- PEREIRA-BARRETO (S.) - 1967 - Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal. TAMBACOUNDA - BAKEL. ORSTOM Centre de Dakar-Hann, ronéo, 51 p., 2 cartes (couleurs).

- PEREIRA-BARRETO (S.), RAYNAL (J.) - 1962 - Reconnaissance Pédo-botanique**³⁵² -
de la sisaleraie de Kolda (Sénégal), esquisse pédologique au 1/25.000.
Ronéo Dakar-Hann.
- PERRAUD (A.), CHEROUX (M.) - 1963 - Etude pédologique de la région Sassandra-**
San Pedro. Ronéo, Centre ORSTOM Abidjan.
- PIAS (J.) - 1958 - Transgressions et régressions du Lac Tchad à la fin de l'ère**
tertiaire ou quaternaire. C.R. Acad. Sci. Tome 246, pp. 800-803
- PIAS (J.) - 1960 a - Sols de la région est du Tchad. Plaines de piedmont.**
Massifs du Ouaddaï et de l'Ennedi. Centre ORSTOM de Fort-Lamy, 302 p.
- PIAS (J.) - 1960 b - Les sols du Moyen et Bas Logone, du Bas Chari, des régions**
riveraines du Lac Tchad et du Bahr El Ghazal, tome I et II. Ronéo, Com-
mission Scientifique du Logone et du Tchad, septembre - 60-23. Imp.
ORSTOM, Mém. n° 2, 13 cartes (couleurs)
- PIAS (J.) - 1964 - Les sols du Tchad. 8 th Intern. Congress of Soil Science.**
Bucharest (Roumanie) V, V 17, pp. 145-151.
- PIAS (J.) - 1966 - Paléosols de la cuvette tchadienne. 6 th Intern. Conf.**
Soil Science, Vol. IV, p.15.
- PIAS (J.) - 1967 - Chronologie du dépôt des sédiments tertiaires - quaternaires**
dans la cuvette tchadienne. C.R. Acad. Sci. Paris, t.264, pp. 2432-2435.
- PIAS (J.) - 1968 - Contribution à l'étude des formations sédimentaires ter-**
tiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et des sols qui en
dérivent (Tchad). Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VI.3-4.
- PIAS (J.), LENEUF (N.) - 1954 - Etude pédologique du bassin alluvionnaire du**
Logone-Chari. ORSTOM Paris, 234 p. 3 cartes (couleurs) au 1/200.000.
- PIAS (J.), BARBERY (J.) - 1964 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000**
Publication ORSTOM n° 15, Paris.
- PIAS (J.), BARBERY (J.) - 1965 - Notice sur les cartes pédologiques de recon-**
naissance au 1/200.000. Feuilles du LAC IRO-DJOUNA. Centre ORSTOM de
Fort-Lamy, 147 p. multigr.
- PIAS (J.), POISOT (P.) - 1965 - Notice sur les cartes pédologiques de recon-**
naissance au 1/200.000. Feuilles d'ABOU DEIA - MALGALME. Centre ORSTOM
de Fort-Lamy, 150 p. multigr.

- PIERI (C.) - 1969 - Etude pédologique de la région de Nioro-du-Rip. Ronéo C.R.A. de Bambey (Sénégal)
- PINTA (M.), OLLAT (C.) - 1961 - Recherches physico-chimiques des éléments traces dans les sols tropicaux. Etude de quelques sols du Dahomey. Géochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 25, pp. 14-23, Pergamon Press L.T.D.
- PION (J.C.) - 1966 - Etude de la fraction fine solide en suspension dans les eaux du Bandama. Fraction amorphe. Mém. ORSTOM S.S.C. Bondy.
- PLAISANCE (G.), CAILLEUX (A) - 1958 - Dictionnaire des sols. La maison rustique, Paris, 604 p.
- QUANTIN (P.) - 1963 - Les sols rouges et jaunes intertropicaux du sud-est de la République Centrafricaine. Ronéo I.E.C.O - 141, janvier.
- QUANTIN (P.) - 1965 - Les sols de la République Centrafricaine. Mém. ORSTOM n° 16, Paris, 113 p. Bibliogr.
- RADIER (H.) - 1957 et 1959 - Le Précambrien saharien au sud de l'Adrar des Iforas. Le bassin crétacé et tertiaire du Gao. Contribution à l'étude géologique du Soudan Oriental. Thèse Sci. Strasbourg et Bull. Géol. Prosp. Min. A.O.F., 1959, 26, 566 p.
- REIFENBERG (A.) - 1935 - Soil formation in the mediterranean. C.R.S. Conf. Intern. Sci. Sol. I, pp. 306-310.
- RICHE (G.) - 1967 - Etude de reboisement et de protection des sols. Etude de la zone vulnérable de Bouaffle. Ronéo centre ORSTOM Abidjan.
- RIEFFEL (J.L.), MOREAU (R.) - 1969 - Etude pédologique de la Haute-Volta, région sud-ouest. Notice ronéo, Centre ORSTOM, Dakar-Hann.
- RIQUIER (J.) - 1963 - Critique de l'article de "Sols Africains" Vol. VI, n° 2,3 intitulé "Passages des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques dans le sud-ouest du Sénégal". Ronéo, mars, 9 p., non publié.

- RIQUIER (J.) - 1965 - La matière organique dans les sols ferrallitiques. Ronéo, Réunion Pédol. ORSTOM, Paris, septembre.
- RIQUIER (J.) - 1966 - Définition et classification des sols ferrallitiques de Madagascar. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV, n° 4.
- RIVIERE (A.) - 1952 - Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Notion de faciès granulométrique. Bull. Soc. Géol. de France, 6ème série, tome II, pp. 155-167.
- ROOSE (E.J.) - 1964 - Etude pédologique du bassin sédimentaire Ivoirien entre Grand Lahou et Abidjan. ORSTOM - IDERT, Adiopodoumé, décembre, 70 p. ronéo, annexe 57 p. 1 carte pédol. 1/200.000, bibliogr. (26 réf.).
- ROOSE (E.J.) - 1965 - Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Station IRAT à Séfa (Casamance). Rapp. multigr. 63 p. 22 tabl.
- ROOSE (E.J.) - 1967 a - Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en Basse Côte d'Ivoire. I - Milieu, dispositif et résultats en 1966.
- ROOSE (E.J.) - 1967 b - Erosion, ruissellement et drainage oblique sous une bananeraie de basse Côte d'Ivoire. Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, 72 p. multigr. fig. bibliogr.
- ROOSE (E.J.) - 1968 a - Erosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire - VIème Conf. WASA, Abidjan.
- ROOSE (E.J.) - 1968 b - Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. Cah. ORSTOM, série Pédol. Vol. VI, n° 2, pp. 235-250.
- ROOSE (E.J.) et BIROT (Y.) - 1970 - Mesure de l'érosion et du lessivage oblique et vertical sous une savane arborée du plateau mossi (Gonse - Haute-Volta. Ronéo centre ORSTOM Abidjan, 147 p.
- ROOSE (E.J.), CHEROUX (M.) - 1966 - Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV, n° 2, pp. 51-92, fig.; 12 tabl., carte H.T. 1/200.000, Bibliogr. (19 réf.)

- RUELLAN (A.) - 1969 - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profils calcaires différenciés des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). Thèse Sci. Strasbourg, multigr. 482 p.
- RUELLAN (A.) - 1970 - Quelques réflexions sur la paléopédologie. Bull. Assoc. Française pour l'étude du quaternaire, 2-3, pp. 179-180.
- SAGATZKI (J.) - 1954 - La géologie et les ressources minières de la Haute-Volta méridionale. Bull. Direct. Mines AOF, Dakar, 22 p. Thèse Nancy.
- SANCHEZ FURTADO (A.F.A.), HERBILLON (A.J.) - 1964 - Les argiles des sols des districts de Urge et de Zaire (Angola). Garcia de ORTA, Revista da Junta de investigações do Ultramar (Lisboa), Vol. 12 (3), pp. 495-514, 5 fig., 1 carte, 5 tabl. Bibliogr. (23 réf.)
- SCHATZ (A.), CHERONIS (N.D.), SCHATZ (V.) - 1954 - Chelation as a biological weathering factor in pedogenesis. Proc. Pensylv. Acad. Sci. 28, pp. 44-51.
- SCHNITZER (M.), DESJARDIN (J.G.) - 1969 - Chemical characteristics of a natural soil leachate from a humic podzol. Canad. J. Soil. Sci. (Ottawa) février, 49, 1, pp. 151-158.
- SCHWERTMANN (C.) - 1966 - Die bildung von goethit und hämatit in böden und sedimenten. Int. Clay. Conf. Jerusalem, 1, pp. 159-165.
- SCHWERTMANN (U.), LENTZE (W.) - 1966 - Bodenfarbe und eisenoxid form. Zeitschrift pflanzenernahrung düngung bodenkunde, 115, 1966, pp. 209-214.
- SCHWERTMANN (V.), FISCHER (W.R.), PAPENDORG (H.) - 1968 - The influence of organic compounds on the formation of iron oxides 9 th Congress Soil Science Adelaide, (Australia), Vol. 1, pp. 645-655.
- SECK (A.) - 1956 - La Moyenne-Casamance. Etude de géographie physique. Extrait de la Rev. Géog. Alpine, tome XLIII, n° 4, 49 p. Institut des Hautes Etudes. Travaux du département de Géographie. n° 4.
- SEGALEN (P.) - 1954 - Détermination des rapports silice/alumine et silice/hydroxydes des sols. Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar série D, X t. IV.

- SEGALEN (P.) - 1956 a - Etude des sols de la plaine du Bas-Sambirano.
Mém. I.S.M., série D, tome VIII, pp. 375-401. Tananarive.
- SEGALEN (P.) - 1956 b - Notice sur la carte pédologique au 1/50.000 des plaines d'AMBILOBE (2 fig.). Mém. I.S.M., série D, tome VII, pp. 317-374, Tananarive.
- SEGALEN (P.) - 1956 c- Les principaux groupes de sols du nord-ouest de Madagascar. 6ème Congr. Intern. Sci. du Sol, Paris, vol. E.V. 91, pp. 561-565.
- SEGALEN (P.) - 1956 d - Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000, feuille n° 13 : MAROVOAY-MAHAJAMBA (Pl. VI à VIII, 23 fig.) Mém. I.S.M., série D, tome VII, pp. 161-259. Tananarive.
- SEGALEN (P.) - 1956 e - Les principaux groupes des sols du nord-ouest de Masagascar. 6ème Congr. Sci. du Sol, Paris, pp. 561-565.
- SEGALEN (P.) - 1957 - Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. Mém. I.S.M., série D, tome VIII, 182 p.
- SEGALEN (P.) - 1964 - Le fer dans les sols. Public. ORSTOM, série initiations, Documentations techniques n° 4, 152 p.
- SEGALEN (P.) - 1966 - Le processus de ferrallitisation et ses limites. Cah. ORSTOM, série Pédol. Vol. IV, n° 4, pp. 15-20.
- SEGALEN (P.) - 1967 a - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes. Ronéo ORSTOM, Bondy.
- SEGALEN (P.) - 1967 b - Les sols et la géomorphologie du Cameroun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. V, n° 2, p. 137.
- SEGALEN (P.) - 1968 a - Problèmes posés par la détermination du fer libre dans les sols à sesquioxides. Ronéo ORSTOM.
- SEGALEN (P.) - 1968 b - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VI, n° 1.

- SEGALEN (P.) - 1969 - Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VII, n° 2.
- SEGALEN (P.) - 1970 a - Etude des constituants sesquioxydiques de sols des zones intertropicales et méditerranéennes., Ronéo Centre ORSTOM Bondy 36 p.
- SEGALEN (P.) - 1970 b - Extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode de De ENDREDY par irradiation à l'ultraviolet de solutions oxaliques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. IX-4.
- SEGALEN (P.) - 1971 - La détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. (à paraître).
- SEGALEN (P.), LEAL SILVA (J.W.) - 1969 - Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à sesquioxydes. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VII, n° 3, pp. 287-310.
- SEGUY (L.) - 1969 - Etude pédologique du bassin versant de Salikenié en Moyenne Casamance. Ronéo, centre Recherches Bambey, (Sénégal), 1 carte.
- SERVANT (M.), SERVANT (S.) - 1970 - Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. Rev. Géog. Physique et de géol. dynamique 2ème série, janvier-mars, pp. 63-76.
- SIEFFERMANN (G.) - 1963 - Carte pédologique du Nord-Cameroun au 1/100.000 Feuille KALFOU. Rapport ronéo IRCAM Yaoundé, n° P/131, 65 p.
- SIEFFERMANN (G.) - 1969 - Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Faculté Sciences Strasbourg. Ronéo 290 p.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.) - 1969 - Altération équatoriale et tropicale des basaltes récents au Cameroun. Intern. Clay Conf. Tokyo (à paraître).
- SIEVER (R.) - 1957 - The silica budget in the sedimentary cycle. Amer. Min. 42, p. 841.

- SIEVER (R.) - 1962 - Silica solubility , 0°-200° C, and the diagenesis of siliceous sediments, Journ. of Géol., 70, pp. 127-150.
- SIEFERT (B.) - 1962 - Quelques réactions de la silice en solution. La formation des argiles. Mem. sér. Cart. Géol. Als.Lor.
- SLANSKY (M.) - 1959 - Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaires cotier du Dahomey et du Togo. Thèse Faculté des Sciences, Université de Nancy.
- SMYTH (A.J.) - 1963 - Sols rouges et sols jaunes du Nigéria Occidental. Colloque Léopoldville, juin.
- SOGETHA - 1962 - Etude agro-pédologique du Dahomey. Ronéo, décembre.
- SOILEAU (J.M.) - 1962 - Evaluation of free iron oxyde distribution and source and significance of red and yellow coloration in certain well drained coastal plain soils. Ph. D. Thesis, Worth Carolina Um. Raleigh University Microfilm 63-1618 Ann. Arbor, Mich.
- SOILEAU (J.M.), MC CRACKEN (R.J.) - 1967 - Free iron and colorat on in certain well drained plain soils in relation to their other propertises and classification. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (Madison) mars-avril, 31,2, pp. 248-255
- SOUCHIER (B.), DUCHAUFOR (PH.) - 1969 - Sur la stabilité des suspensions argileuses en milieu acide. C.R. Acad. Sci. Paris, tome 268, pp. 1849-1852.
- SOUGY (J.) - 1959 - Les formations crétacées du Zemmour noir (Mauritanie septentrionale). Bull. Soc. Géol. France, 1, pp. 166-182.
- SOURDAT (M.) - 1968 - Les formations sableuses de la région de Tuléar. Ronéo Centre ORSTOM de Tananarive. 39 p., 1 carte.
- STAIMESSE (J.P.) - 1967 - Contribution à l'étude des sols jaunes de basse Casamance. Rapport de stage. juillet, 112 p. Ronéo Centre ORSTOM Dakar.
- SYS (CH.) - 1955 - L'importance des termites dans la formation des latosols. Sols Afric. 3, pp. 393-395.

- TARDY (Y.) - 1967 - Etude géochimique des eaux d'une nappe d'arène en pays cristallin (Korhogo). Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor: 20, 4, pp. 235-246. Strasbourg.
- TARDY (Y.) - 1969 - "Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique". Thèse Sci. Strasbourg, multigr. 274 p.
- TAYLOR (R.M.) - 1959 - Amorphous iron oxydes in soils. Sci. Soil. 10, 2, pp. 309-315.
- TAYLOR (R.M.), GRALEY (A.H.) - 1967 - The influence of ionic environment on the nature of iron oxides in soils. Journal of Soil Science, vol. 18, n° 2.
- TEIXEIRA (A.J. DA SILVA) - 1959 - The soils of Portuguese Guinea. 3ème Conf. Interafr. des sols, Dalaba, vol. 1, pp. 467-477.
- TEIXEIRA (A.J. DA SILVA) - 1962 - Os solos da Guine Portuguesa. Carta geral, características, formação e utilização. Estudos, ensaios e documentos n° 100, Lisboa.
- TERCINIER (G.) - 1952 - Rapport sur la prospection pédologique de la région de la Basse Mahavavy. Mém. I.S.M. série D, tome IV, fasc. 2, pp. 183-211 Tananarive.
- TERCINIER (G.) - 1969 - Modifications apportées par la préparation conventionnelle des échantillons de terre à leurs propriétés physiques et hydriques Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VII, n° 4, pp. 583-600.
- TESSIER (F.) - 1952 - Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie ouest du S. négal. Thèse - Marseille. Bull. D.F.M.G. AOF Dakar n° 4.
- THOMANN (CH.) - 1963 - Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols. Méthode au pyrophosphate de sodium. Cah. ORSTOM de pédologie pp. 43- 72.
- THOMANN (CH.) - 1964 - Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest Africain. Cah. de Pédol. ORSTOM, Vol. II, fasc. 3 pp. 43-79

- THOMANN (CH.), FAUCK (R.) - 1971 - (A paraître)
- TITOVA (N.A.) - 1962 - Iron humus complexes of certain soils. Soviet Soil Science, 12, p. 135.
- TOBIAS (CH.) - 1965 - Contribution à l'étude du passage des sols beiges aux sols rouges : Etude d'une toposéquence dans la région de Séfa (Sénégal, Casamance). Ronéo Dakar-Hann, janvier, 113 p., Bibliogr. (16 réf.), graphiques et tableaux analytiques.
- TOBIAS (CH.) - 1968 - Mesure au laboratoire de la perméabilité d'échantillons de sol non remaniés. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. VI, n° 2, pp. 251 à 257.-
- TOBIAS (CH.) - 1969 - Traitement acide de quelques sols tropicaux. Etude de la cinétique d'extraction des composés du fer, de la silice et de l'alumine. Ronéo, Centre ORSTOM Dakar, 36 p.
- TOMLINSON (R.P.) - 1965 - Soils of Northern Nigéria. Samaru Miscellaneous paper n° 11.
- TRAN-VINH-AN (J.) - 1967 - Les systèmes ternaires "oxydes de fer-silice-kaolinite" et la pédogénèse des sols tropicaux. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Physico-chimie minérale. Institut des Sciences de la terre, Heverlie (Belgique).
- TRAN-VINH-AN (J.), HERBILLON (A.J.) - 1966 - Etude expérimentale du système SiO_2/Fe_2O_3 . Applications à la pédogénèse. C.R. Conférence Sols méditerranéens. Madrid, pp. 255-263.
- TRICART (J.) - 1963 - Les changements de climat. Colloque de Rome - UNESCO.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.) - 1965 - Traité de géomorphologie, tome V, le modelé des régions chaudes, forêts et savanes. Paris, SEDES, 322 p. Photogr., fig., graph., tabl., Bibliogr.
- TRICART (J.), MICHEL (P.) - 1965 a - Morphogénèse I - Approche méthodologique géomorphologie et pédologie. Science du sol (Versailles) 1, pp. 69-84 bibliogr. (29 réf.).
- TRICART (J.), MICHEL (P.) - 1965 b - Morphogénèse et pédogénèse. II - Application à l'Ouest Africain. Science du Sol n° 2, pp. 149-171.

- TRICART (J.), MICHEL (P.), VOGT (J.) - 1957 - Oscillations climatiques quaternaires en Afrique Occidentale. Résumé de communication. Vème Congrès Intern. de l'INQUA, Madrid-Barcelone.
- TRICHET (J.) - 1963 - Première étude de quelques complexes du fer et de la silice. Rev. Géogr. phys. et Géol. dynamique V, pp. 327-332
- VALETTE (J.), HIGGINS (G.M.) - 1967 - The reconnaissance soil survey of an area near Auna, Niger Province, Northern Nigeria. Soil Survey Bull. n° 34 Institute for Agricultural Samaru, Zaria, Northern Nigéria, 20 p. 3 cartes au 1/50.000.
- VERNEY (R.) - 1967 - Etude de l'érosion sur "Terres de Barre", comparaison de l'érosion en sol nu et sous jachère arbustive naturelle. Centre ORSTOM, Cotonou 20 p. ronéo.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.) - 1966 - Etude de l'érosion sur "Terres de Barre" érosion sous culture de maïs : maïs sans fumure minérale. Centre ORSTOM, Cotonou, 18 p. ronéo, 7 tabl.
- VIEILLEFON (J.) - 1961 - Notice sur la carte pédologique de reconnaissance ANTONIBE. Publ. ORSTOM - I.R.S.M. Tananarive.
- VIEILLEFON (J.) - 1963 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000. Feuille n° 8 ANTSOHIDY. Publications de l'Institut de Recherche Scientifique de Madagascar, Tananarive - Tsimbazaza. 57 p.
- VIEILLEFON (J.) - 1964 - Notice explicative n° 21. Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/50.000. Feuille de NOSY-BÉ. Publication ORSTOM n° 21, Paris.
- VIEILLEFON (J.), BOURGEAT (F.) - 1965 - Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000. Feuille d'AMBILOBE. ORSTOM, Centre de Tananarive, 92 p. 1 carte.
- VIENNOT (M.) - 1969 - Carte pédologique du Dahomey au 1/200.000. Feuille de DUNKASSA. Ronéo centre ORSTOM Cotonou, 64 p. 1 carte.
- VINE (H.) - 1959 - Studies of soil profiles at the WAIFOR main stations and at some other sites of oil palm experiments. Journal of WAIFOR, 1,4.

- VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.) - 1963 - Notice explicative de la carte des sols au million de la République du . Ronéo Mission ORSTOM, Cotonou.
- WACKERMANN (J.M.) - 1968 - Les faciès pétrographiques de la série de Mako dans les régions de Kanemere et Mamakono (Sénégal Oriental). Centre ORSTOM, Dakar, 34 p. ronéo.
- WAEGEMANS (G.), HENRY (S.) - 1954 - La couleur des latosols en relation avec leurs oxydes de fer. Congr. Intern. Sci. Sol. Léopoldville. V, col. 2, pp. 384-389.
- WALKER (TH.R.) - 1967 - Formation of red beds in modern and ancient deserts. Géol. Soc. Amer. Bull. V, 78, pp. 353-368, 5 fig. 2 pl.
- WANNESSON (J.) - 1963 - Essais sur les propriétés géochimiques de la silice. C.R. Acad. Sci. t. 256 n° 13, 25 mars, pp. 2888-2890.
- WANNESSON (J.) - 1968 - Essai sur les propriétés géochimiques de la silice. Synthèse bibliographique et étude expérimentale. Thèse 3ème cycle.
- WEY (R.), SIEFERT (B.) - 1961 - Reactions de la silice monomoléculaire en solution avec les ions Al^{3+} et Mg^{2+} . Genèse et synthèse des argiles. Coll. Intern. CNRS, 105, pp. 11-23.
- WILLAIME (P.) - 1959 - Reconnaissance pédologique de la palmeraie de Porto-Novo. Ronéo ORSTOM, Dahomey.
- WILLAIME (P.) - 1960 - Les grandes unités pédologiques du sud Dahomey, note préliminaire, ORSTOM centre de Cotonou, ronéo 27 p. schéma au 1/200.000.
- WILLAIME (P.) - 1961 - Etude pédologique de la région d'Agame. Bloc plantation du Mono. ORSTOM, Centre de Cotonou, ronéo 100 p. 28 tabl. 11 graph. 1 carte pédol., 1 carte d'util. des terres au 1/10.000.
- WILLAIME (P.) - 1962 - Les sols du Dahomey. Ronéo Mission ORSTOM, Cotonou 46 p.
- WILLAIME (P.) - 1963 - Carte des sols du DAHOMEY au 1/1.000.000. Notice explicative. Rapport ronéo. Mission ORSTOM Dahomey, 67 p. Bibliogr. carte.

- WILLAIME (P.) - 1965 a - Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000 de la région Nord KANDI. ORSTOM, Centre de Cotonou, 35 p.
- WILLAIME (P.) - 1965 b - Notes sur les sols des régions de DOGBO et de HINVI. 27 p., annexes : descriptions profils, fiches analytiques, 1 carte pédologique des sols au 1/50.000. Centre ORSTOM Cotonou, 40 p.
- WILLAIME (P.) - 1965 c - Erosion "normale" sur terres de barre, 7 p. ronéo 6 tabl. Mission d'études au Dahomey de l'ORSTOM.
- WILLAIME (P.), VOLKOFF (P.) - 1966 - Notice explicative de la carte des sols au 1/5.000 du périmètre d'Agonkamey. Centre ORSTOM, Cotonou, 17 p. ronéo Annexes : fiches analytiques, 1 carte des sols et 1 carte d'utilisation des sols au 1/5.000
- WOLLAST (R.) - 1963 - Aspect chimique du mode de formation des bauxites dans le Bas-Congo. II - Confrontation des données thermodynamiques et expérimentales.

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE

	Pages
A.1 - Carte de situation	8
A.2 - Courbes de fréquence des sables (Profil CA 1)	60
A.3 - Enveloppes des familles de courbes des sols rouges type R - RS 2 du plateau de Sakete (Dahomey)	63
A.4 - Les toposéquences schématiques à sols rouges du Sénégal	71
A.5 - Répartition des sols rouges et des sols associés dans les toposéquences	85

DEUXIEME PARTIE

B.1 - Toposéquence de Séfa (Casamance) : les sols "rouges"	129
B.2 - Toposéquence d'Orodara (Haute-Volta) : les sols "rouges"	131
B.3 - Granulométries de la fraction sableuse des roches-mères	137
B.4 - Granulométries des sables de divers horizons et niveaux des puits HFA et HFB	141
B.5 - Granulométries des secteurs sableux blancs et argilo-sableux rubéfiés du prélèvement HFB 22	145
B.6 - Variation de la granulométrie du squelette quartzeux dans le profil A (Casamance)	148
B.7 - Variation de la granulométrie des sables dans le profil C (toposéquence de Casamance).	149
B.8 - Granulométrie de la fraction sableuse dans les profils A - C - D - E à la même cote horizontale (Casamance)	150
B.9 - Comparaison des granulométries de sables des profils A et B (Casamance)	152
B.10 - Comparaison des profils HFA et HF 33 (Haute-Volta)	154
B.11 - Passage latéral des horizons C aux horizons B sur la même couche sédimentaire	155
B.12 - Comparaison latérale des granulométries de sables : horizons des profils A - B et C (Casamance)	157

B.13 - Etude de la granulométrie des prélèvements CA 429 et CA 448 sur même couche sédimentaire	158
B.14 - Granulométrie de sables des échantillons de surface (profils de Casamance)	161
B.15 - Etude des sables, profil CA 13 (Bignona, Casamance)	166
B.16 - Répartition de l'argile, du fer et du titane dans les horizons profonds du profil HFA (Haute-Volta)	188
B.17 - Minéraux argileux, horizon A, sol rouge de Casamance (CA 131)	198
B.18 - Minéraux argileux, horizon B 2, sol rouge de Casamance (CA 135)	199
B.19 - Courbes granulométriques du profil CA 1	202
B.20 - Dosages d'alumine amorphe, profil A, toposéquence de Casamance	211
B.21 - Domaines de stabilité de la gibbsite, de la kaolinite, du quartz et du feldspath K vis à vis de la solution aqueuse de silice	221
B.22 - Etude des formes amorphes, profil CA 1 Ziguinchor	240
B.23 - Formes amorphes : HLA 49, sol rouge du Dahomey	247
B.24 - Formes amorphes du profil A de la toposéquence de Casamance	248
B.25 - Répartition de l'humus dans un profil "moyen" de sol rouge (Casamance)	267
B.26 - Répartition de l'humus dans le profil A de la toposéquence de Casamance	269
B.27 - Répartition des différentes fractions humiques (méthode TIURIN) dans le profil CA 1	270
B.28 - Courbes de répartition de l'argile dans les horizons supé- rieurs	279
B.29 - Formes amorphes du percolat de la manipulation par lessi- vage : HF 391	300
B.30 - Diagrammes de diffractions aux rayons X après percolation de CA 491	304

LISTE DES TABLEAUXPREMIERE PARTIE

	Pages
A.1 - Profil CA 50 de Casamance : description	14
A.2 - Fiche Analytique du profil CA 50	12
A.3 - Profil CA 1 de Casamance : description	116
A.4 - Fiche Analytique du profil CA 1	117
A.5. - Fiche Analytique du profil CA 1 - suite	118
A.6 - Profil CC 68 de Haute-Casamance : description	119
A.7 - Fiche Analytique du profil CC 68	120
A.8 - Profil NR 2 du Sénégal : description	121
A.9 - Fiche Analytique du profil NR 2	122
A.10 - Profil N 13 du Dahomey : description succincte	15
A.11 - Fiche Analytique du profil N 13	16
A.12 - Profil NAK 2 du Dahomey : description	123
A.13 - Fiche Analytique du profil NAK 2	124
A.14 - Profil HFA de Haute-Volta : description simplifiée	18
A.15 - Fiche Analytique du profil HFA	19
A.16 - Profil HF 3 de Haute-Volta : description	125
A.17 - Fiche Analytique du profil HF 3	126
A.18 - Teneurs en argile dans les profils du Dahomey	27
A.19 - Les différents états des bases	43
A.20 - Conditions climatiques au Sénégal	50

DEUXIEME PARTIE

B.1 - Toposéquence de Séfa : Comparaison à niveau égal des principaux caractères morphologiques des profils	130
B.2 - Granulométrie des sables du profil HFA	138
B.3 - Comparaison des matériaux sous les profils HFA et HFB	142
B.4 - Granulométrie des sables : toposéquence de Casamance	160
B.5 - Granulométries des sables des horizons de surface et de leurs homologues	162

B.6	- Granulométries des sables de l'échantillon 471 et des prélèvements qui lui sont comparés.	163
B.7	- Granulométries de la fraction argileuse du profil HFA	182
B.8	- Analyses mécaniques du prélèvement HFB 7 avec et sans déferrification	183
B.9	- Toposéquence de Haute-Volta - Passage des horizons C à B	189
B.10	- Toposéquence de Casamance - Passage des horizons C à B	190
B.11	- Composition de fractions granulométriques	194
B.12	- Composition de la fraction granulométrique 0-2 microns - profil HFA	195
B.13	- Comparaison des méthodes triacide et fusion alcaline	206
B.14	- Comparaison de couples latéraux des horizons C-B en Haute-Volta	215
B.15	- Profils latéraux des horizons C à B en Casamance	216
B.16	- Les états du fer dans le profil CA 1 de Basse-Casamance	242
B.17	- Les formes du fer dans la toposéquence de Casamance : profil A	243
B.18	- Composition de produits lessivés	302

TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>SOMMAIRE</u>	1
<u>PRESENTATION</u>	4
<u>PREMIERE PARTIE : LES SOLS ET LEUR ENVIRONNEMENT</u>	
<u>GENERALITES</u>	6
<u>/CHAPITRE I/ - Caractérisation des sols</u>	
A - Origine des sondées	7
B - Les profils de référence	
1) Au Sénégal	9
2) Au Dahomey et au Togo	14
3) En Haute-Volta	17
4) Conclusions	20
C - Etude morphologique et analytique des sols	21
1) La différenciation en horizons	"
1.1 - L'horizon humifère	"
1.2 - L'horizon de transition	22
1.3 - L'horizon rubéfié	"
1.4 - L'horizon de passage aux roches-mères	24
1.5 - Conclusions	"
2) Les répartitions granulométriques	26
2.1 - Les méthodes d'étude	"
2.2 - Les horizons supérieurs	"
2.3 - Les horizons B	28
2.4 - Les horizons C	30
2.5 - Conclusions	"
3) Les constituants organiques	31
3.1 - Répartition de la matière organique totale	"
3.2 - Les fractions humifiées	32
3.3 - Conclusions	"
4) Les caractéristiques structurales	33

5) Les données des analyses chimiques	36
5.1 - Les bases échangeables et la saturation du complexe	"
5.1.1 - Dans les horizons supérieurs	"
5.1.2 - Dans les horizons B	37
5.2 - Les éléments totaux	39
5.2.1 - Définitions et méthodes	"
5.2.2 - Le silicium et l'aluminium	40
5.2.3 - Le fer et ses différentes formes	41
5.2.4 - Les éléments Ca, K, Mg, Na	42
5.2.5 - Les éléments divers	43
5.3 - Conclusions	44
6) Les minéraux, les oxydes et les hydroxydes	45
6.1 - Les méthodes	"
6.2 - Les minéraux silicatés	"
6.3 - Les hydroxydes	46
6.4 - Conclusions	47
7) Caractéristiques microbiologiques	"
 D - Conclusions	 48

CHAPITRE II/ - Les facteurs de différenciation

A - Les données climatiques	49
1) Les différents climats	"
1.1 - Au Sénégal	"
1.2 - Au Dahomey et au Togo	50
1.3 - En Haute-Volta	51
1.4 - Conclusions	52
2) Rôle du climat dans la pédogénèse	53
2.1 - Réalité des variations climatiques	"
2.2 - Conséquences des variations climatiques quaternaires	54
2.3 - Actualité de l'évolution de certains sols rouges	55
3) Conclusions sur le facteur climatique	56

B - Les roches mères	57
1) Au Sénégal	"
1.1 - Le Continental terminal	"
1.2 - Les roches-mères en Casamance	59
1.3 - Conclusions	61
2) Au Dahomey et au Togo	61
2.1 - Le Continental terminal	"
2.2 - Les roches-mères	62
2.3 - Conclusions	64
3) En Haute-Volta	65
3.1 - Les grès primaires	65
3.2 - Les grès à yeux de quartz	66
3.3 - Conclusions	67
4) Conclusions sur les roches-mères	"
C - Les données géomorphologiques	68
1) Au Sénégal	69
1.1 - Le modelé de la Casamance	"
1.2 - Le modelé des régions au nord de la Gambie	"
1.3 - Répartition schématique des sols sur le modelé	70
1.4 - Conclusions	72
2) Au Dahomey	"
2.1 - Les modelés	"
2.2 - Place des sols sur les modelés	73
3) En Haute-Volta	74
3.1 - Le type de modelé	"
3.2 - Les sols sur le modelé	"
3.3 - Conclusions	75
4) Conclusions sur le rôle de la géomorphologie	76
D - Les facteurs d'ordre biologique	"
1) La couverture végétale	"
1.1 - Les types de végétation	"
1.2 - Le rôle pédogénétique de la végétation	77

2) Les activités des animaux et des microorganismes	78
2.1 - Les actions animales	"
2.2 - Le rôle des microorganismes	79
3) Les actions humaines	"
4) Conclusions	"

E - Conclusions sur les facteurs de différenciation	80
---	----

/CHAPITRE III/ - Les autres sols sur sables et sur grès 83

Généralités	84
-------------	----

A - Les sols "associés aux sols rouges"	"
---	---

1) au Sénégal	"
---------------	---

1.1 - En Moyenne Casamance	"
----------------------------	---

1.2 - En Basse Casamance	86
--------------------------	----

1.3 - Dans le reste du Sénégal	87
--------------------------------	----

1.4 - Conclusions	88
-------------------	----

2) Au Dahomey et au Togo	"
--------------------------	---

2.1 - Régions centre et est	"
-----------------------------	---

2.2 - Région ouest	89
--------------------	----

2.3 - Conclusions	90
-------------------	----

3) En Haute-Volta	"
-------------------	---

3.1 - Région sud	"
------------------	---

3.2 - Région nord	"
-------------------	---

4) Conclusions sur les sols associés	"
--------------------------------------	---

B - Les sols sur sables et grès dans d'autres régions	92
---	----

1) Les sols "comparables" aux sols rouges	98
---	----

1.1 - Au Tchad	"
----------------	---

1.1.1 - Les roches-mères	"
--------------------------	---

1.1.2 - Les sols	94
------------------	----

1.1.3 - Les interprétations	95
-----------------------------	----

1.2 - Au Niger	96
----------------	----

1.3 - Au Nigéria	"
------------------	---

1.4 - Dans le Nord Dahomey	97
----------------------------	----

1.5 - En Angola et au Mozambique	97
1.6 - A Madagascar	98
1.7 - Conclusions	100
2) Les sols différents des sols rouges	"
2.1 - Les sols hydromorphes	"
2.2 - Les sols peu évolués	101
2.3 - Les sols ferrugineux tropicaux	"
2.4 - Les sols ferrallitiques jaunes	102
2.4.1 - Origine des données	"
2.4.2 - Les sols et leur environnement	"
2.4.3 - Les mécanismes de la différenciation	103
C - Les sols développés sur des matériaux variés mais "simi- laires" aux sols rouges	104
1) Généralités	"
2) Les sols rouges sur roches cristallines acides	105
2.1 - Les faits	"
2.2 - Les interprétations	106
3) Les sols rouges sur basaltes	107
4) Conclusions	109
D - Conclusions sur les autres sols sur sables et grès	109
<u>Conclusions de la Première Partie</u>	112
<u>Annexes de la Première Partie</u>	115
<u>DEUXIEME PARTIE : LES MECANISMES DE LA PEDOGENESE</u>	127
<u>Introduction</u> : La méthode d'étude	128
<u>/CHAPITRE IV/ - Le squelette sableux et son devenir dans les topo- séquences</u>	135
A - Définitions	"

B - Les données granulométriques sur "profils latéraux"	136
1) Réalité de l'hétérogénéité des roches-mères	"
2) Corrélations latérales dans les niveaux de roche-mère	140
2.1 - En Haute-Volta	"
2.2 - En Casamance	143
2.3 - Conclusions	"
3) Passage des roches-mères à des horizons B différenciés	144
3.1 - En Haute-Volta	"
3.2 - En Casamance	147
3.3 - Conclusions	151
4) Passages latéraux d'horizons C à des horizons B	"
4.1 - En Haute-Volta	153
4.2 - En Casamance	"
5) Passages latéraux de l'horizon B à des horizons B et A	156
5.1 - De B vers B au Sénégal	
5.2 - De B vers A au Sénégal	159
5.3 - Conclusions	164
6) Conclusions sur les données granulométriques des sables	"
C - Examens morphologiques et micromorphologiques	165
1) Etude morphologique des sables	"
1.1 - Les observations	"
1.2 - Les interprétations	168
2) Etude micromorphologique d'un profil	"
2.1 - Squelette	169
2.2 - Plasma	"
2.3 - Autres caractères morphologiques	170
2.4 - Interprétations	"
D - Les conclusions du Chapitre I	171
1) Les méthodes	"
2) Les interprétations	172
3) Les références bibliographiques	174
4) Les données nouvelles	175

<u>CHAPITRE V</u> - <u>La différenciation texturale des horizons B</u>	177
A - Les éléments de néoformation de la granulométrie	178
1) Données bibliographiques	"
2) Caractérisation des pseudo-particules	179
2.1 - Les méthodes	"
2.2 - Les résultats	181
2.3 - Les interprétations	183
3) Conclusions	186
B - L'argilification	
1) Les faits et leur importance quantitative	"
1.1 - Toposéquence de Haute-Volta	187
1.2 - Toposéquence de Casamance	190
1.3 - Discussion des résultats analytiques	191
1.4 - Conclusions	193
2) Etude de la fraction granulométrique argileuse	"
2.1 - Composition de la fraction granulométrique	"
2.2 - Etat des minéraux argileux	197
2.3 - Conclusions	203
3) Les mécanismes possibles de l'argilification dans les horizons B	204
3.1 - Transformation des minéraux altérables	205
3.2 - Importation d'éléments particuliers de la taille des argiles	206
3.3 - Importation d'alumine	209
3.4 - Exportation de silice	213
3.4.1 - Etude des horizons C	214
3.4.2 - Conclusion	215
4) La dynamique de la silice	218
4.1 - La libération de la silice	"
4.1.1 - La libération à partir des minéraux altérables	"

4.1.2 - La libération à partir du quartz et de la kaolinite	219
4.1.3 - Conclusions	222
4.2 - La mobilité de la silice	224
4.3 - Le devenir de la silice : les silicifications	226
4.3.1 - Données bibliographiques	"
4.3.2 - Interprétations et conclusions	228
C - Conclusions du Chapitre II	231
<u>CHAPITRE VI</u> - <u>La rubéfaction</u>	233
A - Généralités	"
B - Les données bibliographiques sur la rubéfaction dans les régions tropicales	234
C - Les formes du fer dans les sols rouges sur grès	236
1) Les différents états du fer dans les sols	"
2) Les méthodes d'étude retenues	237
3) Les résultats	241
3.1 - Le fer total	"
3.2 - Le fer libre	"
3.3 - Le fer combiné	242
3.4 - Les hydroxydes cristallisés	244
3.5 - Les formes amorphes	"
3.5.1 - Réalité des formes amorphes	"
3.5.2 - Mise en évidence des amorphes	246
3.5.3 - Conclusions	250
D - Les liaisons du fer avec les constituants du sol	251
1) Les liaisons avec les minéraux argileux	"
1.1 - Données bibliographiques	"
1.2 - Mise en évidence des liaisons dans les sols rouges	253

2) Les relations avec les autres constituants	255
E - Les interprétations et les conclusions	257
1) Les formes du fer et la rubéfaction	"
2) Les bilans du fer	258
2.1 - L'origine du fer	"
2.2 - La concentration des amorphes dans les profils	259
2.3 - Le bilan du fer à l'échelle de la toposéquence	"
3) Importance pédogénétique de la rubéfaction	260
4) Rubéfaction, grésification et cuirassement	262

/CHAPITRE VII/ - La différenciation des horizons supérieurs 264

A - Les faits	
1) Les constituants organiques	265
1.1 - Les fractions humifiées et leur répartition	"
1.2 - La mobilité des constituants organiques	271
1.3 - Les conclusions	273
2) Le phénomène de l'appauvrissement	274
2.1 - Définition	"
2.2 - Caractérisation	277
2.2.1 - Les variations de certains constituants	"
2.2.2 - L'horizon dit "de comportement"	280
2.2.3 - Les variations en valeur relative	281
2.3 - Conclusions	282
B - Les facteurs et les mécanismes de l'appauvrissement	284
1) La matière organique et ses produits de transformation	"
1.1 - Données bibliographiques	"
1.2 - Rôles de la matière organique	286
2) Le facteur biologique	287
2.1 - Le rôle de la faune du sol	"
2.2 - Le rôle des microorganismes	288

3) L'eau et sa circulation	288
3.1 - Le ruissellement	289
3.2 - La percolation	291
C - Mise en évidence de certains mécanismes	294
1) La dégradation de la kaolinite	"
2) Migration de certains constituants	295
2.1 - Les manipulations	"
2.2 - Les résultats	296
2.2.1 - La percolation continue sur des horizons B	"
2.2.2 - La percolation continue sur des horizons supérieurs	297
2.2.3 - La percolation discontinue sur des horizons organiques	299
D - Conclusions sur la différenciation des horizons supérieurs	303
1) Les mécanismes de l'appauvrissement	"
2) Les modifications de l'équilibre pédogénétique	305
3) Les problèmes de classification	306
<u>/CHAPITRE VIII/ - Résumés et Conclusions Générales</u>	308
<u>Liste bibliographique</u>	326
<u>Liste des figures</u>	364
<u>Liste des tableaux</u>	366