TRAVAUX
ET DOCUMENTS
DE L'O.R.S.T.O.M.

RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTEES

A. CHAUVEL

ÉDITIONS DE L'OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

RENSEIGNEMENTS, CONDITIONS DE VENTE

Pour tout renseignement, abonnement aux revues périodiques, achat d'ouvrages et de cartes, ou demande de catalogue, s'adresser au :

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DE L'ORSTOM
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY (France)

- Tout paiement sera effectué par chèque bancaire barré au nom de RÉGIE ORSTOM BONDY, ou par chèque postal (compte n° 9.152-54, Paris, RÉGIE ORSTOM BONDY).
- Achat au comptant possible à la bibliothèque de l'ORSTOM, 24, rue Bayard, 75008 PARIS.

I - CAHIERS ORSTOM

BIOLOGIE
ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET PARASITOLOGIE
HYDROBIOLOGIE
HYDROLOGIE
OCÉANOGRAPHIE
PÉDOLOGIE
SCIENCES HUMAINES

séries trimestrielles — Abonnement : *France* 120 F. *Etranger* 156 F. — 36,30 US dollars

GÉOLOGIE *série semestrielle* — Abonnement : *France* 96 F. *Etranger* 120 F. — 28,00 US dollars

II - BULLETIN ANALYTIQUE D'ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET VÉTÉRINAIRE

12 numéros par an *(15 fascicules)* — Abonnement : *France* 115 F. *Etranger* 130 F. — 30,25 US dollars

Nous vous rappelons, dans la même Collection :

N° 54 — **L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun (caractéristiques et comportements en relation avec les régimes hydriques et les bioclimats)**
F.X. HUMBEL
306 p., 15,5x24, ISBN 2-7099-0414-4 ..... **50 F**

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'O.R.S.T.O.M.
N° 62

O.R.S.T.O.M.
PARIS
1977

RECHERCHES

SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES

Évolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Sénégal)

Armand Chauvel

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part,
« que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées
« à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but
« d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite
« sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (alinéa 1er
« de l'article 40).
« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une
« contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal.»

I.S.B.N. 2-7099-0440.3

© O.R.S.T.O.M. 1977

SOMMAIRE

RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTEES.

Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Sénégal)

	pages
SOMMAIRE	I
AVANT-PROPOS	V
INTRODUCTION	IX

lère Partie

LE MILIEU NATUREL

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 - Le substrat géologique, le modelé et les eaux.	9
Chapitre 2 - La végétation, le climat et l'action de l'homme.	35
Chapitre 3 - La distribution des sols rouges et des sols beiges en Casamance et dans les régions avoisinantes.	57

2me Partie

ETUDE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS

INTRODUCTION 77

Chapitre 4 - Présentation des toposéquences associant sols rouges et sols beiges sous forêt, et de la séquence de sols rouges cultivés. 79

Chapitre 5 - Caractéristiques morphologiques des sols. 87

Chapitre 6 - Caractéristiques granulométriques des sols. 123

Chapitre 7 - Caractéristiques chimiques des sols. 149

Chapitre 8 - Caractéristiques porosimétriques et fonctionnement hydrique des sols. 183

Chapitre 9 - Les données de l'analyse microscopique. 239

3me Partie

ETUDE DES MECANISMES RESPONSABLES DE L'ETAT D'ORGANISATION

INTRODUCTION 297

Chapitre 10 - Approche d'une étude de l'organisation par des voies analytiques spéciales. Extraction des différents assemblages caractéristiques ; leur stabilité et leur cohésion. 299

Chapitre 11 - Approche d'une étude de l'organisation par voie expérimentale. Problème du masquage et du démasquage de la kaolinite. 369

4me Partie

INTERPRETATION D'ENSEMBLE

INTRODUCTION

Chapitre 12 - Synthèse morphologique et réalité des filiations pédologiques en moyenne Casamance. 409

Chapitre 13 - Conditions générales de la transformation des sols rouges de Casamance. Modalités de la propagation des phénomènes. 425

Chapitre 14 - Raisons et enseignements des phénomènes de déferrallitisation. Importance dans la zone tropicale à saisons contrastées de l'Afrique de l'Ouest. 465

CONCLUSIONS GENERALES.

AVANT - PROPOS

Depuis les premières tâches qui me furent confiées, il s'est trouvé que la plupart d'entre elles se situaient au croisement des principales spécialités de la science du sol. Ceci m'a conduit à solliciter chaque fois des enseignements, des collaborations et des aides qui m'ont toujours été largement accordées. Aussi est-ce une joie pour moi de remercier ici ceux qui ont ainsi participé à l'évolution de mes connaissances, puis à l'élaboration des idées exprimées dans ce mémoire et, enfin, à leur présentation.

En 1959, dans le cadre de la société générale des techniques hydro-agricoles, opérant en Tunisie, il me fut d'abord demandé de procéder à des appréciations technologiques des sols, basées principalement sur leurs caractéristiques physiques, afin d'apprécier leurs aptitudes aux cultures avec ou sans irrigation. L'appui scientifique fourni par l'O. R. S. T. O. M. en la personne de M. Patrice ROEDERER (qui dirigeait alors le service pédologique de Tunisie), puis en celle de M. Georges AUBERT, membre de l'Académie d'Agriculture, m'apparut alors déterminant, dans la mesure où il permettait, en situant les sols dans le contexte de leur évolution par l'emploi d'une classification morpho-génétique, non seulement de mieux les cartographier, mais encore de prévoir leurs transformations éventuelles par l'effet de la mise en valeur.

Il me fut alors accordé de suivre le cycle d'enseignement de pédologie, puis, quelques années plus tard, de poser ma candidature à l'Office et de la voir acceptée. Je tiens à remercier M. le Professeur G. CAMUS, directeur général de l'O. R. S. T. O. M., et M. J. SEVERAC directeur général adjoint, pour le cadre de travail qui m'a été depuis lors offert, me permettant de réaliser l'essentiel de ce que je souhaitais, et en particulier de disposer du temps et des moyens nécessaires pour effectuer les travaux de recherche que je présente ici.

J'ai bénéficié, dès les premiers jours passés à l'O. R. S. T. O. M., de l'enseignement et des conseils de deux maîtres qui n'ont cessé de me guider.

C'est à M. Georges AUBERT que je dois ma formation de pédologue, le goût très vif de ce métier et l'orientation de mes travaux. Il m'a fait bénéficier de sa grande expérience des sols tropicaux, attirant toujours mon attention sur la nécessité de concilier les objectifs techniques au service du développement agricole et les impératifs scientifiques. Je le remercie de la confiance qu'il m'a faite en acceptant de faire partie de mon jury.

M. Stéphane HENIN, membre de l'Académie d'Agriculture, chargé de mission auprès du Directeur de l'I. N. R. A., m'a enseigné la physique du sol et ses conceptions sur les problèmes de méthodologie. De plus, il a accepté de me recevoir quelques années plus tard dans ce laboratoire des sols qu'il animait de sa présence et de ses idées. Sous la direction de mes parrains scientifiques M. G. MONNIER et M. G. PEDRO, directeurs de recherches à l'I. N. R. A., j'y ai passé des périodes particulièrement formatrices et enrichissantes, trouvant là les moyens d'aborder les problèmes

soulevés par les études faites sur les sols africains. C'est de tout cela que je suis heureux de pouvoir le remercier ici.

C'est grâce aux conseils de M. Gérard MONNIER que j'ai pu me rendre compte des effets déterminants exercés par les interactions entre les constituants des sols ferrallitiques sur leur comportement physique et mettre au point une approche analytique de ce problème. Je lui suis reconnaissant d'avoir été ainsi à l'origine des travaux de recherche poursuivis depuis lors.

A la suite de cette première étape, l'importance prise par les problèmes de minéralogie et de physicochimie a incité M. Georges PEDRO à accepter de bien vouloir assurer ma direction scientifique. Depuis lors, et particulièrement durant ces dernières années passées au laboratoire des sols, c'est par un dialogue presque journalier qu'il m'a aidé à analyser et apprécier toutes les données recueillies, tant sur le terrain qu'au laboratoire, me faisant sans cesse réfléchir aux questions les plus importantes du sujet, envisager les différentes hypothèses possibles et dégager une conception d'ensemble des phénomènes pédogénétiques mis en cause, précisée par la suite à l'aide de quelques essais de pédologie expérimentale. L'expression même des résultats fut l'objet d'échanges innombrables et fort enrichissants pour moi. Je ne saurais jamais assez le remercier pour la somme de temps et de réflexion qu'il m'a ainsi consacrée.

Au cours de ce travail, il est apparu que l'évolution se traduisait par des variations de l'assemblage des constituants que seules permettaient d'interpréter les données de l'analyse microscopique. C'est à cette occasion que M. Gérard BOCQUIER, professeur à l'Université de PARIS VII a bien voulu m'accorder son aide, me montrant qu'un raisonnement logique permettait d'établir avec rigueur les relations génétiques et fonctionnelles qui caractérisent les organisations pédologiques. Je lui exprime ma gratitude pour tout l'intérêt qu'il a porté à ce travail et qu'il m'a communiqué et le remercie d'avoir bien voulu faire partie de ce jury.

Ma profonde reconnaissance s'adresse également à Monsieur le doyen MILLOT pour avoir accepté de me recevoir à STRASBOURG puis de présider ce jury de thèse. Au cours d'une exaltante tournée au Cameroun, il m'a montré l'intérêt d'une rencontre et d'un dialogue entre les spécialistes des différentes disciplines des sciences de la terre. Il a aussi attiré mon attention sur bien des problèmes qui se sont révélés déterminants pour la poursuite de ce travail.

Je remercie également M. J. LUCAS, professeur à la faculté des Sciences de STRASBOURG qui a bien voulu participer au jury, manifestant ainsi l'intérêt qu'il porte aux sols de Casamance.

L'ensemble de ce travail n'aurait pas pu être réalisé si je n'avais bénéficié, tant sur le terrain qu'au laboratoire, de beaucoup d'aides, de conseils, d'échanges et de collaborations amicales.

En Afrique, c'est à M. Roger FAUCK que je dois ma première initiation aux sols tropicaux ainsi que cet intérêt tout particulier porté à

à la région et aux sols de Casamance qui font l'objet de cette étude.

Je remercie également tous ceux qui m'ont fait bénéficier, sur le terrain, de leur connaissance des sols; en particulier MM. R. BOULET , B. KALOGA, J. C. LEPRUN, P. MERCKY et S. PEREIRA BARRETO.

Je pense aussi à ceux qui m'ont si souvent accueilli à SEFA, m'ont transmis leur expérience de ce pays et m'ont apporté une aide précieuse, en particulier à M. J. BIRIE-HABBAS directeur de la Station, ainsi qu'à MM. R. BERTRAND, L. SEGUY, C. PIERI, P. SIBAND et H. THIROUIN.

Je remercie tout spécialement M. Charles TOBIAS, pour son hospitalité chaleureuse et pour son infatigable collaboration : beaucoup de données exposées dans ce rapport sont le résultat d'un travail commun.

Je ne saurais oublier l'aide que m'ont apportée les travailleurs casamançais et en particulier M. KEBA DRAME: ils ont creusé pour moi de nombreuses tranchées, mais aussi et surtout m'ont fait connaître leur terroir et ses particularités.

Ma reconnaissance va aussi à ceux qui sont venus me rejoindre sur les toposéquences : Mademoiselle Hélène PAQUET et M. Alain RUELLAN. Elle s'adresse également à M. Jacques VIEILLEFON dont la collaboration fut amicale dans un domaine complémentaire du mien.

Au Centre National de Recherches Agronomiques du Sénégal, j'ai bénéficié de toute l'aide que je pouvais souhaiter. J'en remercie MM. L. SAUGER et R. TOURTE, directeur et directeur adjoint et spécialement mon ami Claude CHARREAU qui m'a fait connaître certains problèmes posés par ces sols sablo-argileux de la zone tropicale sèche et m'a montré tout l'intérêt que présentaient les résultats des essais culturaux pour une meilleure connaissance de leur pédogénèse.

Au Centre de Recherches Pédologiques O. R. S. T. O. M. de DAKAR, beaucoup de résultats analytiques ont été obtenus sous la direction de Mademoiselle Christiane THOMANN et de M. Dominique RAMBAUD. L'étude microscopique des sols a été commencée grâce à l'aide et aux conseils de MM. Alain BLOT, Pierre MERCKY, Jean Claude PION et Jean Marie WACKERMANN. De nombreuses séparations granulométriques "spéciales" ont été réalisées par M. Konko ALIOUNE SY.

De retour en France, j'ai été accueilli au Département de Science du sol de l'I. N. R. A. où je ne me suis jamais senti étranger, mais où, au contraire, j'ai pu bénéficier d'innombrables collaborations. Je tiens à en remercier très vivement MM. J. CHAUSSIDON et R. BETREMIEUX, respectivement directeur et directeur adjoint de la Station.

Le laboratoire des sols a été plus particulièrement pour moi un lieu de travail privilégié et je n'oublierai pas tous ceux qui m'y ont chaque jour aidé et soutenu : Mademoiselle J. BERRIER au cours des expériences et jusque dans la rédaction de ce mémoire; M. D. TESSIER par sa collaboration et de passionnantes discussions sur l'organisation des matériaux argileux, MM. A. B. DELMAS et M. M. ROBERT par leurs conseils, MM. M. HERVIO, G. VENEAU et l'ensemble de l'équipe pour les services de tous ordres qu'ils m'ont rendus.

Je remercie également Madame Ch. NOUGAREDE d'avoir dactylographié avec tant de compétence ce volumineux rapport, et Madame G. LAURENT d'avoir bien voulu en assurer l'achèvement et les corrections dans des conditions difficiles.

Aux services scientifiques centraux de l'O. R. S. T. O. M. à BONDY, j'ai également trouvé une aide précieuse : un dialogue enrichissant avec M. P. AUDRY et F. X. HUMBEL sur le comportement physique des sols ; l'aide des laboratoires dirigés par MM. PELLOUX et PINTA; celle de MM. PARROT, VERDONI et PLOTTE pour la réalisation des lames minces, celle de M. COMBROUX et de M. GOULIN pour la réalisation des cartes, celle du service des publications dirigé par MM. BONNET DUPEYRON et HIERNAUX, celle de Mesdames LATOUCHE, VIEILLARD, DECOBERT et ROTH qui ont préparé et assemblé ce mémoire, celle de Madame C. MASSONI et de Madame M. H. PERROT enfin qui m'ont fourni tous les documents et renseignements utiles.

Je remercie ma fille d'avoir réalisé la plus grande partie des dessins contenus dans ce document.

Toutes les étapes de ce travail ont nécessité beaucoup de temps. Je remercie M. N. LENEUF, président du Comité technique de pédologie de s'être montré compréhensif pour me permettre d'en assurer l'achèvement.

INTRODUCTION

L'existence de sols différents, dits sols "rouges" et sols "beiges", développés en Casamance sur les mêmes formations gréso-argileuses a, depuis toujours, retenu l'attention des pédologues de l'Afrique de l'Ouest. Mais c'est MAIGNIEN (1961), qui le premier a pensé que le contact si marqué entre les deux types de sols pouvait permettre d'étudier efficacement le "passage" des sols ferrallitiques aux sols ferrugineux tropicaux, c'est-à-dire d'aborder un problème qui, comme le disait cet auteur,"domine la pédologie tropicale".

Au Sénégal s'observent en effet, compris entre la limite septentrionale des sols ferrallitiques au sud, et les sols brun subarides au nord, des sols qui ont été reconnus et décrits par AUBERT dès 1945 sous l'appellation de "sols ferrugineux tropicaux". Relativement bien définis quelques années plus tard, ils ont été alors divisés en deux grandes catégories (AUBERT et MAIGNIEN, 1947):

- les sols ferrugineux tropicaux non lessivés appelés "DIOR" (ce qui signifie, en langue woloff "terre à arachide");
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés, correspondant aux sols "BEIGES";

les seconds étant, de loin, les plus étudiés dans l'Afrique de l'Ouest.

Le problème qui s'est posé à nous, dès le début de nos études en Casamance, était donc de savoir si la limite entre les sols rouges et les sols ferrugineux tropicaux beiges avait bien la signification envisagée par MAIGNIEN, et s'il en était ainsi, d'essayer de préciser quelles étaient les raisons et les mécanismes éventuels affectant dans cette région les sols rouges ferrallitiques, lorsqu'ils sont soumis à des conditions plus arides que celles correspondant à une évolution typiquement ferrallitique (sous un climat soudano-guinéen par exemple).

A cet effet, la moyenne Casamance constitue un cadre particulièrement approprié à la réalisation de recherches de ce genre, et ce, pour deux ensembles de raisons :

- Les premières sont relatives aux conditions mêmes de la pédogénèse qui, selon différents travaux, et notamment ceux de MAIGNIEN

(1968), sont ici les plus favorables à la différenciation de sols ferrugineux tropicaux beiges :

. cette région est située à la limite des variantes maritimes et continentales du bio-climat sahelo-soudanais;

. la végétation naturelle y est constituée par une forêt claire sèche de type soudanais, présentant une strate arborée et un tapis herbacé;

. les sols sont développés sur les formations gréso-argileuses du "continental terminal";

. enfin, il existe de grandes surfaces planes sur les plateaux, en sorte qu'il est possible d'éliminer pratiquement, au moins dans un stade initial, toute influence des remaniements.

- Les secondes raisons ont trait à l'existence d'une intervention humaine contrôlée, ou à défaut, relativement bien connue.

En effet, dans cette région, dont l'économie agricole est axée sur des cultures annuelles, MAIGNIEN a mis en évidence, dès 1961, une évolution des sols rouges consécutive à leur utilisation. Une modification des conditions naturelles de la pédogénèse se traduit donc ici par une transformation indubitable des sols ferrallitiques.

Or, il ne faut pas oublier qu'à partir de 1949 une expérience très remarquable de culture mécanisée a été effectuée à Séfa (Casamance), par la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux(C. G. O. T.) après défrichement d'environ 10 000 hectares, et qu'elle est poursuivie depuis 1962 par la Société de développement agricole et industriel de Casamance (S. O. D. A. I. C. A.). Aussi peut-on aisément reconstituer l'histoire de la mise en culture, et surtout préciser les changements des conditions pédo-bioclimatiques qui en ont résulté (*); ceci dans le but d'interpréter les variations morphologiques et analytiques effectivement constatées. Ce travail a été rendu possible grâce aux observations réalisées avant défrichement par FAUCK (1955).

---

* On a été grandement aidé pour cela par la connaissance des résultats de mesures bio-climatologiques effectuées à la Station de recherche agronomique de Séfa.

L'exploitation de ces données a déjà été faite à des fins agronomiques (CHARREAU et FAUCK, 1970). Notre objectif est ici d'en tirer parti pour une meilleure connaissance de la pédogénèse et de la dynamique actuelle de l'évolution superficielle en Casamance. D'ailleurs, un complément d'information nous a été fourni aussi par des travaux effectués en collaboration avec SIBAND (1971) sur une série de sols rouges cultivés de façon traditionnelle, depuis des temps qui s'échelonnent entre 0 et 90 ans. La comparaison de ces profils, interprétée à la lumière des données relatives à l'histoire culturale (enquête réalisée par SIBAND), et qui correspond en quelque sorte à une approche expérimentale de la pédogénèse, sera d'un grand secours dans la réalisation de notre étude.

Ces considérations générales étant présentées, le travail qui a été réalisé sera exposé en quatre parties :

- La première partie est consacrée à une étude détaillée du milieu naturel de la moyenne Casamance où se trouvent associés sols rouges et sols beiges; elle aboutit à montrer que la distribution des 2 types de sols obéit en fait à une certaine loi de répartition.
- La seconde comportera une étude morphologique et analytique de ces sols, distribués de façon ordonnée dans le paysage sous forme de toposéquences. L'accent y sera mis plus particulièrement sur les problèmes du fonctionnement hydrique (chapitre 8) et sur les transformations de l'organisation microscopique (chapitre 9). Elle aboutit à démontrer que les sols beiges proviennent effectivement de la transformation des sols rouges.
- Dans la troisième partie seront envisagés les mécanismes responsables de la transformation de l'organisation des sols ferrallitiques, en faisant appel à des techniques analytiques originales et à des travaux de pédologie expérimentale.
- Enfin la quatrième partie sera consacrée à une interprétation d'ensemble. Dans cette partie, après avoir effectué une synthèse morphologique, on s'efforcera de préciser les conditions générales de la transformation des sols, avant de récapituler les principaux enseignements de l'étude.

Première Partie

LE MILIEU NATUREL

LE MILIEU NATUREL

INTRODUCTION : le paysage casamançais et les problèmes pédologiques abordés

"La Casamance"

"La Casamance est un fleuve-lac, un Niagara, et tout bordé de courtes vagues marines. Dans la forêt, des bourgs sans âge, d'une propreté troublante, car la propreté nous semble moderne..."

"Le fétiche de la reine était un arbre, semblable à un platane géant ; autour de lui on avait dégagé une place, qui permettait de deviner qu'il dominait la forêt. D'un enchevêtrement ganglionnaire de racines, montaient des pans d'arbres droits comme des murs rassemblés en un fût colossal, qui, trente mètres plus haut, s'épanouissait souverainement. L'encoignure de deux de ces murs-de-tronc, hauts de plus de cinq mètres, formait une chapelle triangulaire, séparée de la place par une petite barrière que la reine seule pouvait franchir, et surtout par un sol nettoyé avec soin comme celui des cases de village ; car la place était couverte de la neige soyeuse du Kapok qui tombait inépuisablement. Dans cette pureté onirique, le sang caillé des sacrifices ruisselait de l'arbre.

Le sentiment du sacrifice s'accordait plus puissamment pour moi à cette colonne de majesté, qu'il ne s'était accordé à aucun temple. Je ne contemplais pas un arbre admirable, un prince-des-arbres (bien qu'il fût aussi cela) mais un arbre évocateur d'un monde où il entraînait surnaturellement les hommes, comme les dieux de l'Egypte étaient évocateurs des morts".

A. MALRAUX - Antimémoires.

1/ - Les trois composantes principales du paysage : l'arbre, l'eau et les bas plateaux gréseux.

Séduit par son nom, André MALRAUX avait voulu voir la Casamance. Il en a dégagé et traduit l'essentiel : l'arbre et l'eau.

La troisième composante du paysage est à peine discernable tant les pentes sont faibles et le couvert végétal important, qui limite presque partout l'horizon. Il s'agit d'un relief fait de vastes et bas plateaux gréseux, débouchant sur de larges vallées auxquelles on accède par quelques gradins en marches d'escalier.

De très larges cours d'eau, dont le niveau est voisin de celui de la mer s'étendent majesteux et calmes, les uns découverts comme la Casamance, les autres masqués par une végétation aquatique et subaquatique, parfois sur plusieurs kilomètres de largeur. La remontée des eaux salines s'y fait sentir, surtout pendant la saison sèche, jusqu'à 150 kilomètres de la mer (en amont de Sédhiou). Les activités humaines et en particulier la culture du riz se concentrent sur leurs bords.

2/ - Caractères généraux de la Casamance et plus spécialement de la moyenne Casamance.

La région de Casamance est une province méridionale de la République du SENEGAL. Elle est limitée au Nord par la frontière de Gambie (pays qui la sépare du reste du Sénégal), au sud par celle de la Guinée Bissau, à l'ouest par l'Océan Atlantique et à l'est par la rivière Koulountou.

Certaines de ses limites sont administratives : il s'agit des frontières avec la Gambie et avec la Guinée Bissau. Pourtant, nous verrons que l'enclave constituée par la Gambie, coïncide sensiblement avec une limite naturelle marquée par la végétation. Et cette limite apparaît également climatique, car elle correspond approximativement à celle du tracé de la courbe isohyete de 900 mm.

Au sud, on passe insensiblement des paysages de Casamance, aux paysages plus humides de Guinée Bissau.

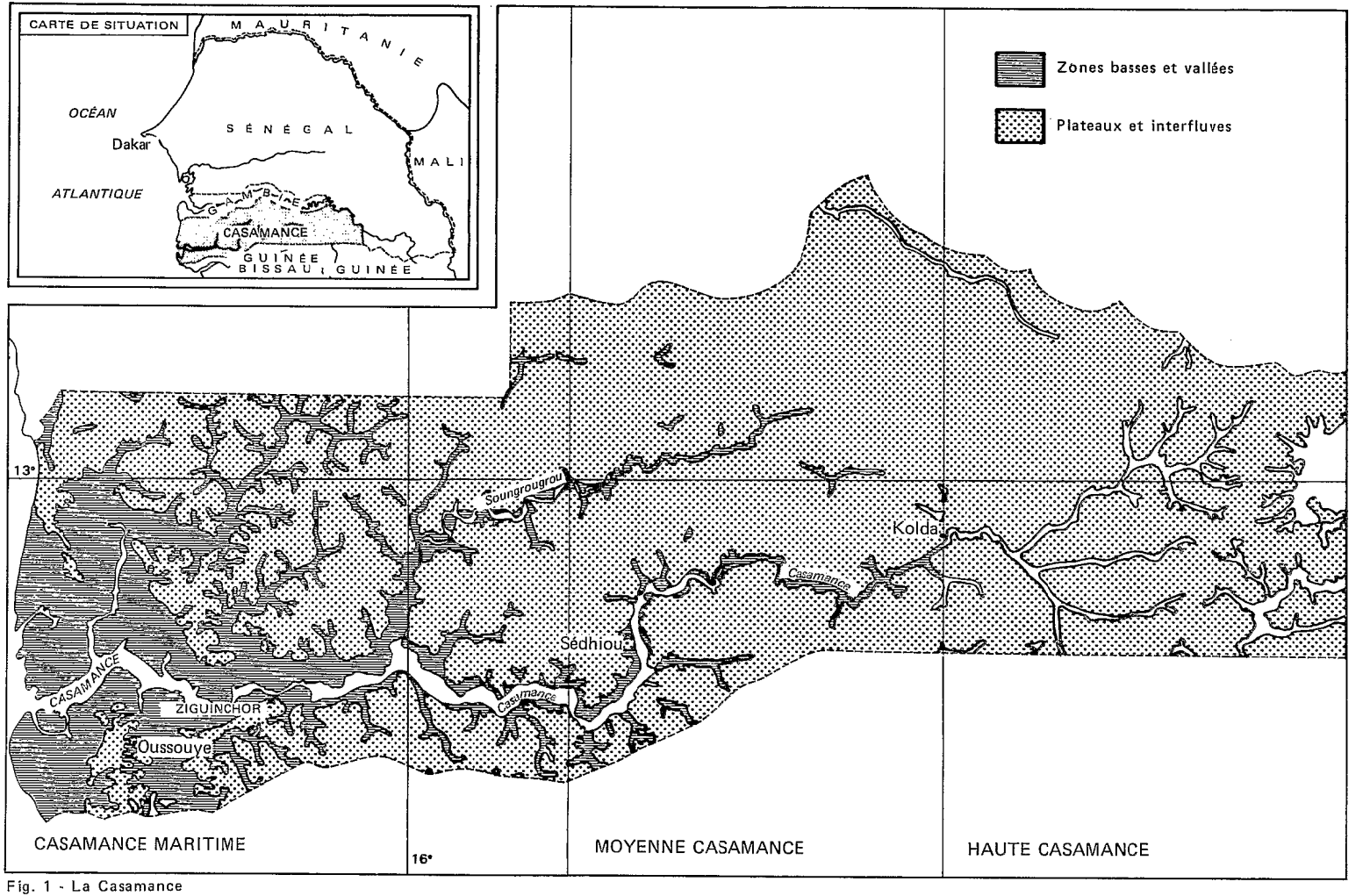


Fig. 1 - La Casamance

Trois paysages différents permettent de diviser, d'ouest en est, cette région de Casamance grosso modo en trois parties (fig. 1) :

- La basse Casamance est caractérisée par une pénétration importante des eaux marines dans le continent. Celles-ci s'insinuent par un réseau très dense de marigots soumis à la marée. A ceci est liée la dominance des zones basses correspondant à des dépôts de boues marines fixées par les mangroves, qui ont fait l'objet du travail de VIELLEFON (1974). Les zones plus hautes de basse Casamance représentent des affleurements de grès argileux.

- La moyenne Casamance est formée par de vastes et bas plateaux gréso-argileux, découpés par les vallées de la Casamance, du Songrougrou et de leurs affluents. On se situe là à la limite du domaine d'extension atteint par les eaux marines, dont la remontée est perceptible en saison sèche.

- La haute Casamance. Les grands cours d'eau y font place à un réseau hydrographique plus lâche et plus déficient. Seules quelques rivières, telle la Kayanga, gardent un débit soutenu pendant toute la saison sèche. Sur les grands plateaux se développent des cuirasses affleurantes ou Bowés, qui, encore peu répandus, prennent cependant de l'extension à l'approche du Sénégal Oriental.

Cette région de Casamance se situe à la limite du bioclimat sahélo-soudanais, partagée entre une variante maritime de type guinéen à l'ouest et une variante continentale à l'est (AUBREVILLE, 1948) "Les pluies de mousson y sont intenses pendant 5 mois, elles se déclenchent brusquement au mois de juin avec un maximum diluvien au mois d'août et se terminent aussi brusquement au mois d'octobre. De novembre à mai, pendant 7 mois consécutifs règne une saison sèche absolue". C'est surtout durant cette dernière que se manifestent les différences entre les variantes maritimes et continentales : les premières étant caractérisées par une humidité moyenne plus grande avec des écarts moindres durant l'année, les secondes par des variations de la tension de vapeur d'eau très élevées et un fort déficit de saturation.

A ces bioclimats correspondent des paysages végétaux particuliers. Selon AUBREVILLE (1948) "c'est par contraste avec les paysages désolés en saison sèche des régions sénégalaises situées plus au nord, jusqu'au Sine Saloum, que la Casamance a la réputation d'un pays verdoyant couvert de forêt épaisse. Cette renommée n'est valable que comparativement au Sénégal. Par comparaison avec la côte sud de Guinée, la Casamance paraît bien ce qu'elle est en réalité, un pays sec."

La région de Casamance, et plus particulièrement celle de moyenne Casamance, se situe donc à la limite entre des paysages végétaux différents: forêt sempervirente dans les secteurs les plus humides, savane dans les zones les plus sèches. Entre ces deux extrêmes, une forêt qu'un géographe PELISSIER (1967) a étudiée et décrite en ces termes : " Dans son ensemble, le paysage des plaines et plateaux de Casamance est uniformément constitué par la forêt sèche soudanienne, arbres aux fûts gris et tortueux, aux frondaisons vert foncé, dominant soit un sous-bois ligneux, soit un tapis d'herbes denses et vivaces qui alimente en saison sèche des feux de brousse si répétés que les associations végétales ne peuvent nulle part être considérées comme primitives".

Dans la forêt sont dispersés des bourgs et villages. Ils sont entourés d'une zone de taillis qui marquent la première enceinte, anciennement défrichée, puis épuisée, faute d'enrichissement organique. Parfois les villages se sont déplacés pour exploiter de nouvelles terres et leur ancien site ne reste marqué que par quelques baobabs au milieu d'une brousse chétive.

Alors que dans d'autres régions d'Afrique, le paysage tend à se diversifier en fonction de l'hétérogénéité des sols, de l'occupation humaine ou du climat, en Casamance, le paysage végétal, modifié par l'intervention humaine et par le feu tend toujours à se reconstituer. Cette reconstitution d'un équilibre naturel sol-végétation est un des premiers éléments à retenir.

3/ - Les données pédologiques générales - Problèmes posés par leur interprétation.

Dans ce paysage peu diversifié des bas plateaux gréseux de Casamance, un contraste apparaît cependant de façon très évidente, manifesté

par les couleurs des sols, rendues apparentes par les termitières épigées, constituées de matériaux remontés de diverses profondeurs. Ces couleurs vont du rouge vif aux bruns pâles en passant par toutes les nuances des rouges jaunes et des jaunes rouges.

MAIGNIEN (1961) a été amené à montrer qu'à ces contrastes de couleur correspondaient des transformations profondes de la pédogénèse. Les études qu'il a effectuées l'ont conduit :

- à constater que tous ces sols sont formés à partir du même matériau originel : formations gréso-argileuses du "Continental Terminal", mélange de grains de quartz, de kaolinite et de sesquioxydes de fer,
- à classer les sols "rouges" dans la classe des sols ferrallitiques (*) (caractéristiques des zones humides) et les sols de couleur plus pâle, à nuance brune dominante, rassemblés sous la dénomination de sols "beiges" dans la classe des sols ferrugineux tropicaux (caractéristiques des climats à saison plus contrastée).
- à observer que les sols "rouges" sont dominants au sud et à l'ouest, plus particulièrement en Casamance maritime, qu'ils sont associés aux sols "beiges" en moyenne Casamance, mais qu'ils deviennent plus rares au nord et à l'est, notamment en haute Casamance ou dominent les sols beiges.

On se trouve donc ici à la limite entre les deux grands domaines de sols tropicaux : sols ferrallitiques et sols ferrugineux tropicaux, et ceci, sur un même matériau originel dont la composition minéralogique est relativement simple.

Le travail entrepris sera de tenter d'appréhender et de résoudre les problèmes posés par cette situation plus particulièrement, en moyenne

---

(*) AUBERT (1948) avait déjà signalé l'appartenance de ces sols à la classe des sols ferrallitiques. Plus récemment FAUCK (1971), après avoir étudié les mécanismes pédogénétiques responsables de leur évolution a confirmé cette position.

Casamance sur les plateaux gréseux du continental terminal et sur leurs rebords.

Des sols "rouges" et des sols "beiges" y sont en effet associés et se succèdent dans le paysage. Ils y sont même organisés en toposéquences pédologiques, qui vont faire plus spécifiquement l'objet de notre étude.

Chapitre 1

LE SUBSTRAT GÉOLOGIQUE, LE MODELÉ ET LES EAUX

A - APERCU GEOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES DE LA ROCHE MERE DES SOLS DE MOYENNE CASAMANCE.

1/ - Formations gréseuses du Continental terminal.

Les vastes plateaux qui occupent la plus grande partie de la Casamance sont constitués par des formations détritiques sub-horizontales, gréso-argileuses, kaoliniques, désignées sous le terme général de "Continental terminal".

Cette appellation a été créée par KILIAN (1931) pour désigner les "niveaux continentaux tertiaires du Sahara surmontant la série hamadienne".

Ce même terme a été par la suite utilisé pour nommer "d'autres formations continentales tertiaires post-éocène" (DIENG 1965), en particulier celles qui correspondent au bassin sédimentaire qui couvre la plus grande partie du Sénégal, et, entre autre, cette région casamançaise qui fait l'objet de notre étude. Selon MICHEL (1960), ces formations proviendraient de l'érosion d'anciens sols latéritiques qui couvraient, vers l'est, le massif guinéen (*).

---

* Selon les travaux récents de TESSIER, FLICOTEAUX, LAPPARTIENT, NAHON et TRIAT (1975), l'origine du "Continental terminal" dans les bassins sédimentaires cotiers de l'ouest africain est à reconsidérer. Il s'agirait, en fait, d'une épaisse frange d'altération superficielle affectant des sédiments marins sablo-argileux et glauconieux, d'âges échelonnés du Crétacé supérieur au Miocène. Plus que l'origine de ces formations géologiques, intervient ici la nature du matériau originel des sols, dépendante de l'altération ferrallitique.

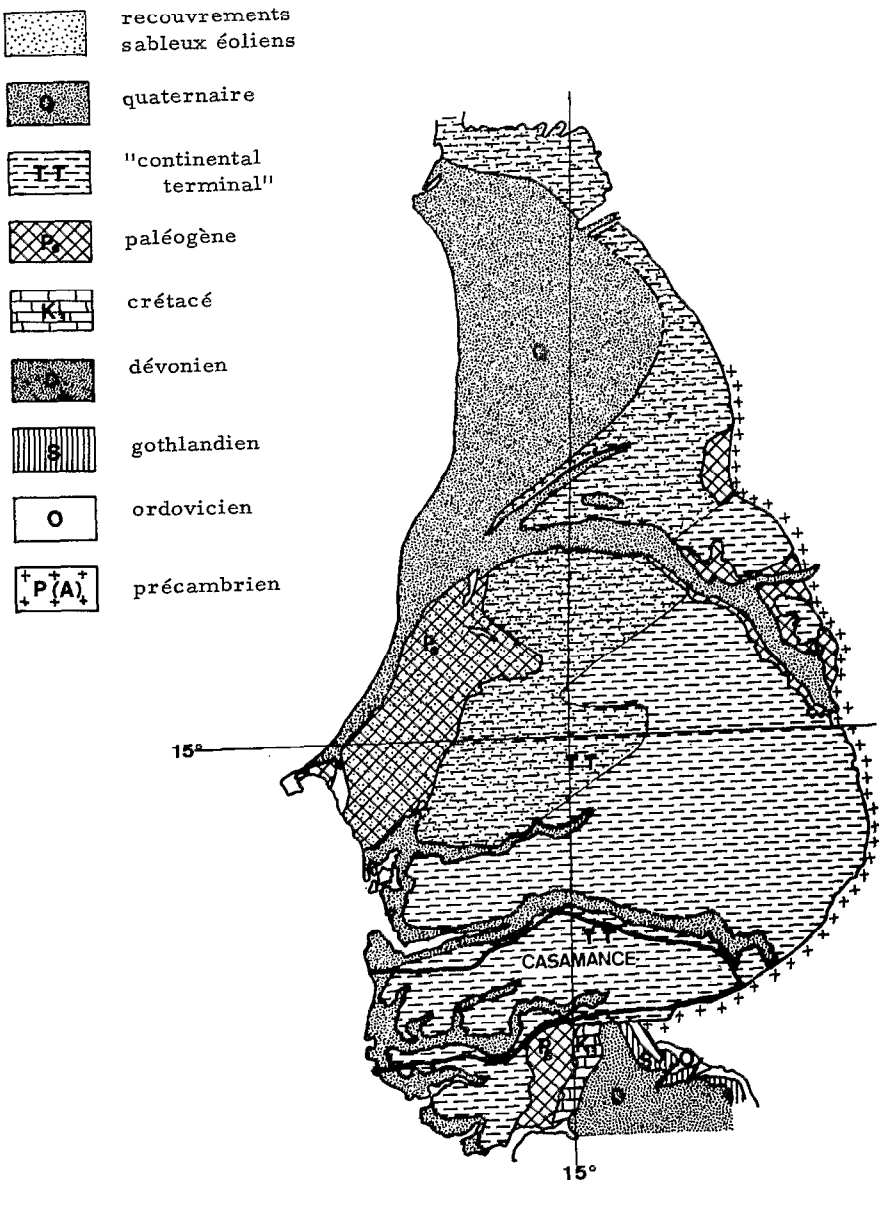


Fig. 1-1 - Situation de la Casamance sur la carte géologique (extrait de la carte géologique de l'Afrique à l'échelle de 1/5.000. 000 - ASGA - UNESCO - 1963).

Les limites de ce bassin sédimentaire sont reproduites sur la carte ci-jointe (fig. 1-1). Il y apparaît que le secteur étudié se situe dans la partie la plus méridionale et la plus occidentale de ce bassin.

DIENG (1965), dans l'étude qu'il a faite de ces formations, précise qu'elles sont comprises entre les dépôts marins datés de l'éocène et la "latérite" du quaternaire, mais que l'âge de ces dépôts varie selon les régions en raison de la durée de la régression marine au sein de ce vaste bassin sédimentaire. Ces formations débutent ainsi à l'éocène moyen sur la bordure orientale du bassin, se poursuivent à l'éocène supérieur au centre et ne sont plus que d'âge pliocène à l'ouest et, plus particulièrement en Casamance.

L'épaisseur de ces formations est toujours relativement réduite dans cette région. Selon un rapport du B.R.G.M. (1967), elle est de l'ordre de 40 à 50 mètres,en Casamance.

FURON (1960) souligne la grande similitude de tous les faciès des formations du "Continental terminal" échelonnées dans le temps. Cette similitude manifeste le caractère convergent de matériaux qui sont tous profondément altérés et dans lesquels ne subsistent que les minéraux les plus résistants : il s'agit principalement de kaolinite, de quartz et de sesquioxydes de fer, accompagnés de faibles quantités de minéraux lourds, seuls témoins de l'origine première et lointaine de ces formations détritiques.

L'hétérogénéité de ces dépôts, ne portera donc que sur la proportion relative de ces constituants, sur leur distribution dans l'espace, sur leur granulométrie et éventuellement sur l'état des minéraux qui en constituent le squelette (plus ou moins arrondis, corrodés, fissurés...).

DIENG (1965) qui a étudié plus particulièrement la bordure orientale du bassin sédimentaire distingue trois formations dans le Continental terminal du Sénégal :

- le "continental terminal inférieur" (ou "assise de Nieré Kô") corrélé avec les formations marines de l'éocène moyen,
- le "continental terminal moyen" (ou "assise de Gambie" qui possède les mêmes associations sporo-polliniques que les formations marines de l'éocène supérieur-oligocène.

- le "continental terminal supérieur" (ou "assise du Ferlo"), corrélé avec les formations marines du mio-pliocène, serait donc pratiquement seul représenté en Casamance.

Les formations gréseuses du "continental terminal" supérieur, surmontées par un niveau cuirassé, couvrent la majeure partie du territoire sénégalais. Leur puissance atteint 150 mètres. Elles sont constituées par les "grés argileux versicolores ou grès de Goudiry" subdivisés eux-mêmes en 3 faciès qui sont, de bas en haut :

- les grès argileux bariolés
- les grès argileux rubanés
- les grès argileux blanc rouille.

DIENG (1965) précise que ces 3 faciès peuvent n'être pas tous visibles au même endroit et que l'on passe insensiblement de l'un à l'autre. Le plus répandu est, selon lui, représenté par les grès argileux blanc rouille, qu'il décrit ainsi : "C'est un grès argileux blanc, à larges taches d'oxyde de fer brun-rougeâtre ou parcouru par des veines ou auréoles rose-violacé. La roche est tendre, à grains hétérométriques. Elle peut contenir des lits grossiers ou les grains de quartz passent parfois à des graviers, des passées plus fines d'argile kaolinique et quelquefois de minces niveaux latéritiques".

Observé au microscope, ce grès présente "une structure hétérogranulaire avec légère prédominance des petits cristaux de quartz sur les moyens et les gros. Ces grains de quartz sont corrodés et ferruginisés. Le ciment d'argile kaolinique est très abondant. Aucun fossile n'y a été observé".

Etant les plus répandus et les plus superficiels, ce sont ces "grès argileux blanc rouille" qui constituent, dans la majeure partie des cas le matériau originel des sols. Les grès correspondant aux faciès plus profonds n'en diffèrent, selon DIENG (1965) que "par leur plus grande homogénéité et leur moindre richesse en argile (1/5) pour ce qui est des "grès rubanés", leurs colorations plus vives (en jaune, brun, rouge, rose, violet..) la finesse de leur grain et leur teneur intermédiaire en argile (1/4) pour ce qui est des "grès bariolés".

Les résultats donnés par DIENG (1965), relatifs à 4 échantillons de grès du continental terminal supérieur, prélevés à proximité de la bordure orientale du bassin sédimentaire, sont rassemblés dans le tableau 1-1.

On retiendra :

- que ces grès contiennent près de 50 % d'argile, quelquefois plus ; il s'agit donc d'une argile sableuse,
- que les valeurs de l'indice de TRASK, indiquent qu'il s'agit, dans tous les cas, de sédiments bien triés ($Qg < 2,5$),
- que les émoussés luisants sont plus abondants que les non usés ; ils présentent des coins arrondis et sont caractérisés par un "picotis luisant". Les ronds mats sont pratiquement absents,
- que l'association de minéraux lourds est caractéristique des roches éruptives acides, ce qui permet à DIENG de préciser que ces grès proviennent probablement des granites et pegmatites du socle birrimien.

2/ - Roches mères des sols de Moyenne Casamance.

En ce qui concerne le "continental terminal" de moyenne Casamance, les données particulières sont beaucoup plus rares.

Selon l'article du B.R.G.M. (1967) déjà cité, les faciès, apparemment plus tranchés, sont les suivants :

- grès argileux rose tendre hétérométriques
- argiles sableuses mauves
- plus rarement argiles "lie de vin".

Les études faites par LAUNAY et WACKERMANN (1964), par CHAUVEL (1965), par FAUCK et DELAUNE (1971) portant sur quelques échantillons prélevés dans les puits de Casamance (tableau 1-1) révèlent des teneurs en argile plus faibles et plus irrégulières que dans les grès de la partie orientale du bassin sédimentaire (30 à 40 %), des sables également triés, mais de plus petite taille (médiane 200 µ), l'absence de grains non usés et le développement considérable des émoussés luisants, plus ou moins corrodés et ferruginisés selon les niveaux. Les mêmes associations de minéraux lourds sont révélatrices d'une origine commune.

Tableau 1-1.

CARACTERISTIQUES DES GRES ARGILEUX DU "CONTINENTAL TERMINAL" SUPERIEUR

ECHANTILLONS	GRANULOMETRIE						CARACTERISTIQUES DES SABLES				
	ARGILE	SABLES ET LIMONS					MORPHOSCOPIE			CONSTITUANTS	
	%	%	Q 1	M d	Q 3	Q g	N. U. %	E. L. %	R. M. %	principaux	minéraux lourds %
Bordure orientale du bassin sédimentaire(1)											
D - 156-3	54, 7	45, 3	0, 21	0, 37	0, 65	1, 74	34	66	0	quartz	0, 15
D - 174-3	55, 4	44, 6	0, 18	0, 36	0, 63	1, 92	46	52	2	"	0, 26
D - 307-3	51, 6	48, 4	0, 17	0, 35	0, 65	1, 95	46	50	4	"	0, 30
D - 308-7	55, 0	45, 0	0, 22	0, 38	0, 60	1, 64	48	52	0	"	0, 10
Moyenne Casamance(2) (valeurs moyennes)	30 à 40	60 à 70	0, 13	0, 200	0, 36	1, 69	0	100	0	"	0, 22

(1) Echantillons étudiés par DIENG (1965) - (2) Valeurs moyennes approchées pour quelques échantillons étudiés par LAUNAY et WACKERMANN (1964) - CHAUVEL (1965) - FAUCK et DELAUNE (1971).

- Granulométrie des sables
  - Q 1 = 1er quartile
  - Md = médiane
  - Q 3 = 3e quartile
  - Q g = coefficient de TRASK = $\sqrt{\frac{Q\,3}{Q\,1}}$ (d'autant plus élevé que le sable est moins bien classé).
- Morphoscopie
  - N. U. % = Non usés %
  - E. L. % = Emoussés Luisants %
  - R. M. % = Ronds mats %

- Minéraux lourds : même association minérale pour tous les échantillons : zircon, tourmaline, rutile, anatase, distchène, staurotide, épidote.

L'observation microscopique a porté sur quelques lames minces préparées à partir d'un échantillon prélevé à près de 25 mètres de profondeur dans un puits de moyenne Casamance ; il s'agit d'un grès de couleur blanche, parcouru de veines et d'auréoles rose violacé, d'aspect irrégulièrement stratifié (planche I).

Elle a permis de constater :

- que les variations de coloration ne sont directement liées, ni à la taille, ni à la distribution, ni à la nature des constituants : grains de quartz hétérométriques noyés dans un plasma constitué de kaolinite et d'oxyde de fer,

- que ces variations de coloration sont par contre révélatrices de l'état et de l'organisation de ces constituants : l'incrustation des quartz par les oxydes de fer semble être plus généralisée dans les veines rose violacé que dans les parties plus blanches et surtout le plasma argileux y prend un aspect différent : finement ponctué de rouge sombre, il tend à former de petits nodules de forme arrondie, laissant place à des vides intergranulaires. Dans les zones plus claires, toutes les gradations sont observées entre des matériaux ne présentant aucune organisation apparente du plasma et des vides et d'autres d'aspect plus "grumeleux" dans lesquels se dessinent des vides interpédaux,

- que dans ces matériaux existent des ferri-argilanes de couleur rose violacé, c'est-à-dire des dépôts illuviaux qui résultent d'une migration concomittante de l'argile et des oxydes de fer.

Il apparaît ainsi que les matériaux du "continental terminal" de Casamance, roches mères de tous les sols étudiés, présentent un certain nombre de caractères, liés à des phénomènes de corrosion du squelette quartzeux ainsi qu'à la redistribution du plasma argilo-ferrugineux qui semblent résulter d'une évolution en place, postérieure au dépôt.

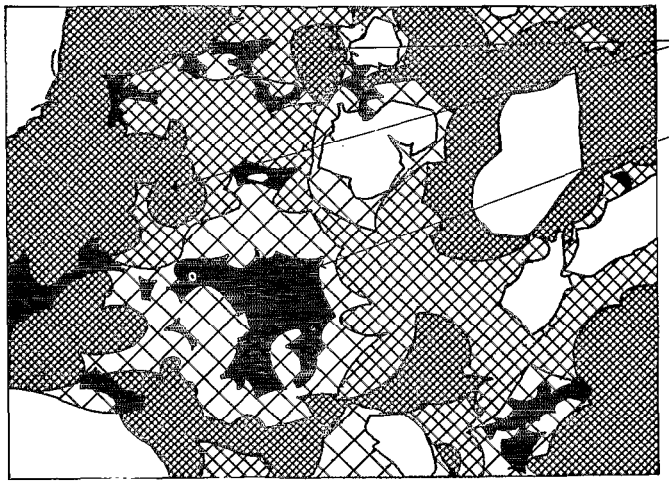
Cette évolution a pour effet de masquer (ou même de simuler) les effets des phénomènes de transport (éolien et fluviatile) qui auraient présidé à la mise en place des matériaux.

- quelques grains de quartz très grossiers, corrodés, fragmentés, incrustés d'oxyde de fer
- plasma argilo-ferrique
  - très dense à opaque
  - dense
  - clair

} d'aspect grumeleux

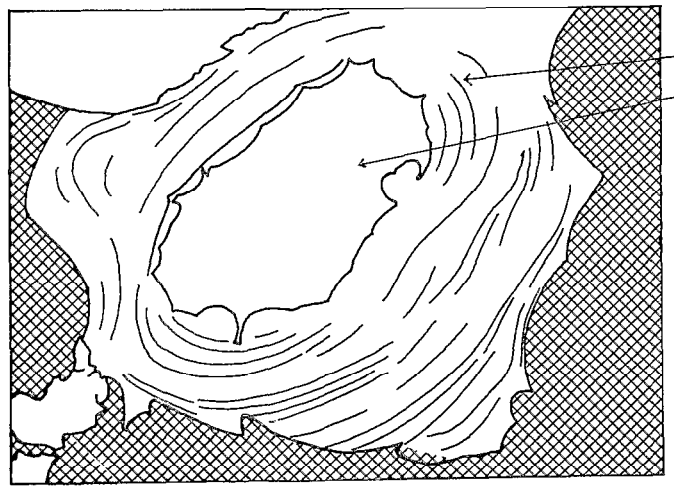
- vides

L.N.



- le plasma dense argilo-ferrique tend à former de petits nodules de forme arrondie
- vides

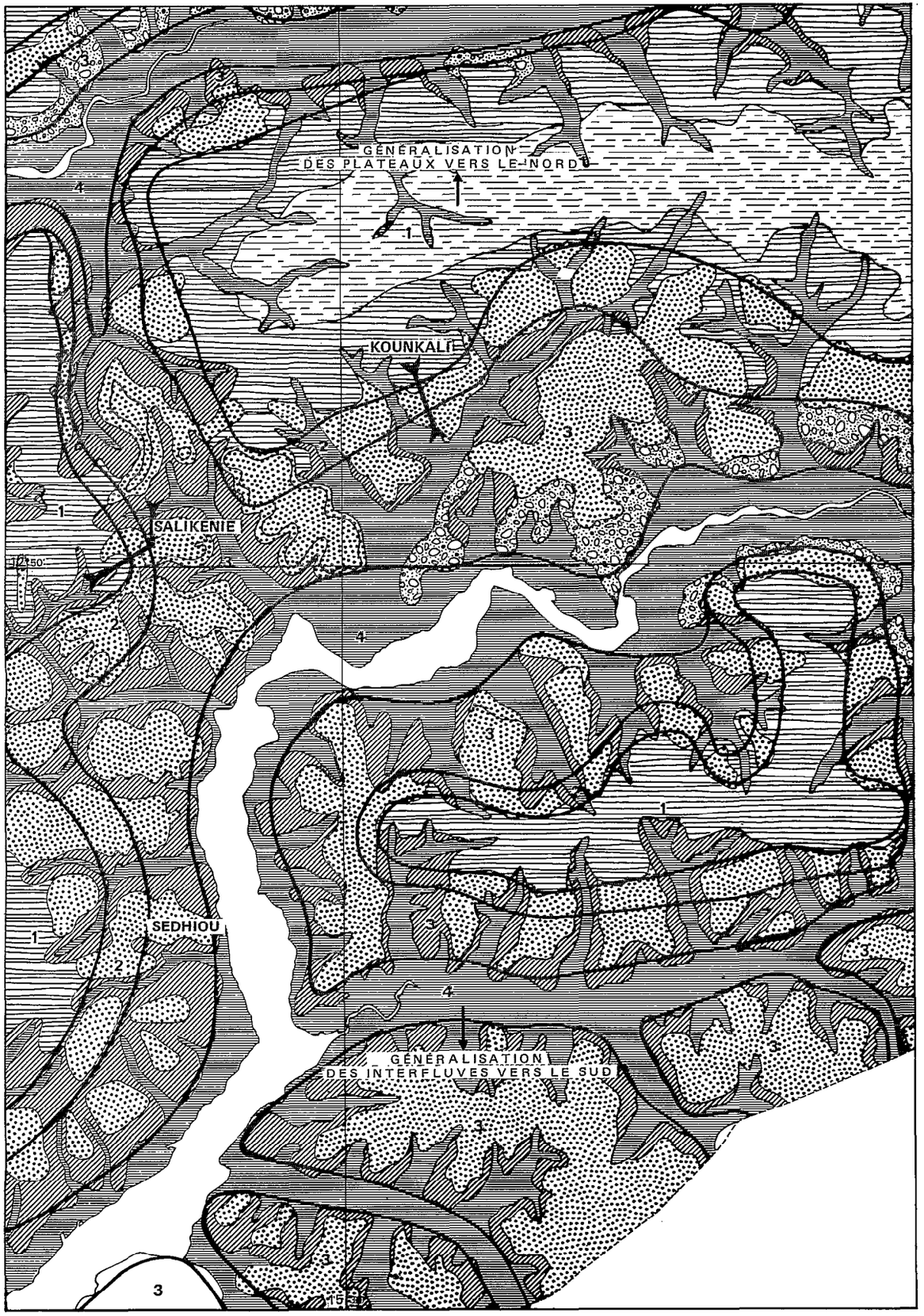
L.P.



- ferriargilanes rose violacé
- vide

L.N.

Planche 1 - Grès bariolés du "Continental terminal" (veines rose violacé).



DISTRIBUTION DES SOLS ROUGES
ET BEIGES SUR LES RELIEFS DE PLATEAU
ET D'INTERFLUVE

- Sols rouges { typiques / de transition / peu épais sur cuirasse
- Sols beiges de plateau
- Sols beiges hydromorphes
- Sols beiges de pente
- Sols peu évolués sur mat. de dém. de cuir.
- Sols halomorphes et hydromorphes

LES RELIEFS

1 - Domaine des plateaux
2 - Auréole de relief discontinu
3 - Domaine des interfluves et vallées latérales
4 - Domaine des vallées principales
— Limites morphologiques

L'IMPLANTATION DES TOPOSÉQUENCES
ET SÉQUENCES DE SOLS RETENUES POUR CETTE ÉTUDE

- Toposéquences de Salikenie
  de Kounkali
- Séquence de sols cultivés de Sedhiou

Carte extraite de la carte pédologique à l'échelle de 1/200000 dressée par TOBIAS (1968), complétée par les cartes à petite échelle de FAUCK, SEGUY, TOBIAS (1968), BETRAND (1970), et par des observations faites au cours de l'étude.

Fig. 1-2

3/ - Conclusions.

Les matériaux du "continental terminal", roches mères de tous les sols étudiés sont caractérisés en premier lieu par le fait qu'ils ne contiennent que des minéraux relativement résistants : quartz, kaolinite et sesquioxydes de fer accompagnés de faibles quantités de minéraux lourds.

Nés d'une altération ferrallitique, ces matériaux dont les constituants sont stables et peu nombreux, ne peuvent être fortement affectés que par les processus de différenciation pédologique qui donnent la prépondérance aux phénomènes d'organisation et de réorganisation sur ceux de transformation chimique et minéralogique.

On se trouve en présence à la fois des éléments d'un squelette : le quartz, et de ceux d'un plasma (des particules trop fines pour qu'il soit possible de les déterminer optiquement - WACKERMANN 1966 - BOULET 1974) dont le constituant essentiel est la kaolinite. Les sesquioxydes de fer étant susceptibles, quant à eux, de figurer soit avec les premiers (sous forme d'incrustations dans les quartz ou d'éléments figurés), soit avec les seconds sous forme de mélanges ou d'associations de kaolinite et de sesquioxyde de fer.

B - MODELE ET NIVEAUX INDURES.

1/ - Observations générales et disposition des niveaux indurés.

a) Plateaux, interfluves et vallées.

Dans le paysage peu contrasté de moyenne Casamance, se distinguent (fig. 1-2) :

- au nord, de vastes plateaux (indiqués par le chiffre 1 sur la carte), larges de 8 à 20 kilomètres sans reliefs notables.

Leurs pentes, très faibles dans l'ensemble, sont orientées :

. du côté externe vers des axes de drainage périphériques ; elles s'accentuent progressivement sur les versants les raccordant aux vallées où elles peuvent

atteindre 2 à 5 %.

. du côté interne vers de petits thalwegs, plus ou moins bien individualisés, qui collectent les eaux superficielles des plateaux et les acheminent vers les têtes de vallées latérales ; elles ne dépassent pas 2 %.

Entre ces deux pentes, un léger relief émoussé, décelable seulement par levé topographique (sa hauteur ne dépasse pas quelques mètres) constitue une sorte de bourrelet discontinu à profil convexe autour du plateau (chiffre 2 sur la carte).

- au sud des interfluves (chiffre 3 sur la carte), larges de 1 à 8 kilomètres, au relief convexe, séparés par des vallées.

- entre les deux, sur une zone qui s'étend sur près de 30 kilomètres, desformes de transition entre ces bourrelets périphériques de plateau (isolés par un réseau hydrographique de mieux en mieux défini) et les interfluves.

Dans la plupart des cas, l'altitude de ces reliefs, qui s'élève faiblement d'ouest en est, se situe entre 20 et 50 mètres.

Les vallées (chiffre 4 sur la carte) ont l'aspect de couloirs à fonds plats, au tracé tortueux marqué par des coudes et des rétrécissements. Elles sont plus ou moins colmatées par des alluvions localement argileuses. Au bord des grands cours d'eau, (Casamance et Songrougrou) ces alluvions s'ordonnent en terrasses.

b) Cuirasses et carapaces.

Des niveaux indurés, ou qui s'indurent lorsqu'ils sont mis à jour, apparaissent à la faveur des versants de ces vallées. Dégagés par l'érosion, ils forment des ressauts en marches d'escalier bien caractéristiques des paysages des vallées de Casamance. Tels qu'ils apparaissent, ces matériaux correspondent à des cuirasses ferrugineuses.

Les pédologues : COINTEPAS (1960), TOBIAS (1965), SEGUY (1969), FAUCK (1972), les hydrogéologues : NAPIAS (1967), rapport B.R.G.M. (1967), GOUZE (1969) et les géographes : PELISSIER (1967), MICHEL (1969) s'accordent à reconnaître plusieurs niveaux cuirassés ou susceptibles d'être indurés.

Selon NAPIAS et GOUZE, interprétant de nombreuses coupes de puits étudiées et repérées de façon précise en moyenne Casamance, trois niveaux doivent être distingués :

- Les deux plus élevés sont généralement situés au-dessus des niveaux phréatiques :

  . Le premier, épais de 2 à 10 mètres, fortement induré et compact, affleure plus particulièrement au nord et à l'est de la région, sa cote étant toujours supérieure à 45 mètres. Très érodé, il présente une forme d'altération qui rappelle les dolines, avec formation de cuvettes peu profondes et accumulation de matériau argilo-limoneux au centre, susceptibles de recueillir et de garder les eaux superficielles durant une partie de la saison sèche (mares temporaires). Plus au sud et à l'ouest, ce niveau est démantelé, souvent décapé, ne subsistant plus là où la cote est inférieure à 40 mètres.

  . Le second niveau présente une épaisseur assez continue, de l'ordre de 4 à 6 mètres. Sensiblement moins induré, il est caractérisé par un réseau de chenaux dus à l'infiltration et peut-être à des cassures et par une porosité fine inhérente à la nature de ses ciments. Sa cote se situe aux alentours de 30 à 35 mètres. C'est ce niveau induré que nous avons exploré le plus fréquemment dans la région de Sédhiou.

- Le troisième est habituellement situé sous le niveau phréatique, aussi ne peut-il être observé qu'à partir des puits et des prélèvements effectués dans les sondages.

  Beaucoup plus sporadique, il est situé dans les sables argilo-gréseux du continental terminal, au niveau de la zone basse de balancement actuel de la nappe (soit, selon la carte de courbes isopièzes établie par GOUZE (1969), à une cote inférieure à 20 mètres dans une grande partie de la moyenne

Casamance).

Les caractères du second niveau induré (le plus largement représenté en moyenne Casamance) ont été observés plus particulièrement sur le versant de la petite vallée dans laquelle coule le Marigot de Salikénié à proximité de Séfa (fig. 1-3).

On observe sur ces versants, à des cotes voisines de 20 à 30 mètres, deux affleurements discontinus de cuirasse, dont les altitudes diffèrent de 2 à 4 mètres selon les endroits, formant ressaut en marches d'escalier. Là où la surface topographique ne recoupe qu'une cuirasse, ou plus souvent encore, n'en laisse apparaître aucune, on les retrouve à même altitude, recouverts par des épaisseurs de terres qui peuvent aller de quelques décimètres, à plus de 5 mètres selon les lieux.

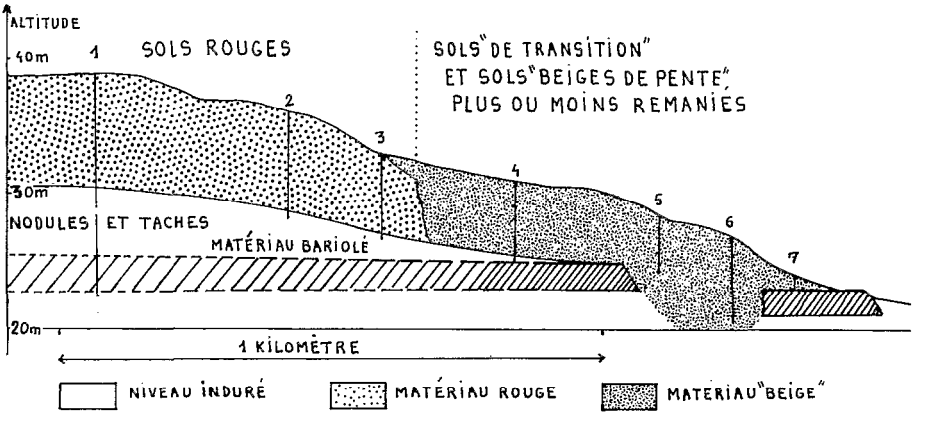


Fig. 1-3 - Coupe schématique du 2e niveau induré sur le versant de la vallée de Salikenié.

La variation latérale de la morphologie et de l'induration des niveaux correspondants a été appréciée grâce à une série de tranchées, regroupant celles des toposéquences étudiées par SEGUY (1969), CHAUVEL (1971) et FAUCK (1972). Ce niveau a été suivi, depuis l'affleurement dans la vallée, jusqu'au cœur de l'interfluve situé à 1,5 kilomètre et à 13 mètres de profondeur.

On a ainsi mis en évidence :

- une faible élévation progressive de sa cote (de l'ordre de 2 mètres sur 1 kilomètre), à mesure que l'on s'éloigne de la vallée,
- une diminution de son induration et de la netteté de ses limites,
- un accroissement de son épaisseur.

L'observation des matériaux indurés révèle des caractères communs à l'ensemble :

- une porosité large : réseau de chenaux qui semble être le siège d'une circulation d'eau puisqu'on y trouve des sables "lavés". Leur diamètre est compris entre 3 et 20 millimètres, tandis que leur volume interne est plus ou moins occupé, suivant le cas, par de la terre rouge clair finement structurée, par des micro-agrégats rouges, par des sables quartzeux blancs et, localement, par quelques argilanes blanc jaune. Ce réseau peut s'étendre à toute l'épaisseur du niveau induré ou être limité à sa partie inférieure.
- des "noyaux à cortex" entre ces chenaux ; de taille centimétrique, de forme arrondie et anastomosés entre eux, ils ont, en leur centre, la structure d'un grès mais présentent une différenciation concentrique plus ou moins accusée. La périphérie de ces noyaux est soulignée par des lisérés blanchâtres à limites diffuses, ou par des ferri-argilanes rubanés, rouge sombre à noir, présentant des limites nettes. En certains endroits, plusieurs liserés ou plusieurs ferri-argilanes concentriques sont observés en superposition.
- transition plus ou moins nette ou progressive avec un matériau sus-jacent, bariolé, contenant des nodules bien individualisés et avec un matériau sous-jacent, argilo-sableux, à dominante jaune et teintes contrastées ocres, violettes, rouges et blanchâtre, contenant des noyaux à cortex violet sombre ou noir.

L'étude comparative des matériaux prélevés (en allant de l'affleurement vers l'interfluve) met cependant surtout en évidence des caractères de différenciation latérale ; elle fait apparaître ainsi :

- une teneur en fer relativement forte (dépassant 15 % pour l'échantillon global), puis s'abaissant jusqu'à devenir à peine supérieure à

à celles des matériaux encaissants au centre de l'interfluve (4 à 7 % selon les niveaux)

- une répartition des chenaux, limitée à la partie inférieure du niveau induré près de l'affleurement (les niveaux supérieurs étant dépourvus de cavités), puis se généralisant progressivement à l'ensemble du matériau.

- un remplissage des chenaux incomplet et divers à proximité de l'affleurement (quartz lavés, revêtements argileux gris clair, micro-agrégats rouges), devenant plus homogène en direction de l'interfluve (terre rouge clair finement structurée, poches de sable lavé et d'argilanes blanchâtres).

- une conformation des parois des chenaux, constituées de ferri-argilanes rubanés noirs, épais de plusieurs millimètres à proximité de l'affleurement, puis de plus en plus fins, faisant place à des décolorations périphériques blanchâtres qui se développent progressivement à mesure que le niveau s'enfonce au cœur de l'interfluve.

- une différenciation plus grande des noyaux en bordure de la vallée marquée par l'importance des cortex rouge sombre à noir, s'atténuant graduellement pour laisser la prédominance au matériau d'aspect gréseux rouge là où le niveau est plus profondément enterré.

La continuité de cette variation latérale est brusquement et localement interrompue (fig.1.3, profils 5 et 6). Un matériau induré réapparaît cependant de façon tout aussi brusque, 250 mètres en aval, à une cote légèrement inférieure (- 2 mètres), assez semblable par ses caractéristiques morphologiques, bien que plus induré et plus différencié, présentant une patine noire en surface, des revêtements blanchâtres sur les parois des chenaux, des taches ocre-rouille sur les cassures et une tendance à se fragmenter en blocs anguleux ou arrondis.

L'ensemble de ces observations met donc en évidence :

- une discontinuité verticale, correspondant au niveau induré lui-même ; très marquée à proximité de l'affleurement, s'atténuant progressivement à mesure qu'elle apparaît à une profondeur plus grande, en direction de l'interfluve.

- une continuité latérale, manifestée par la gradation des caractères de différenciation du niveau induré, qui atteignent leur maximum au niveau de l'affleurement.

- une discontinuité latérale marquée par l'interruption brutale et le faible décalage de ce niveau, limitée aux quelques centaines de mètres situés en bas du versant (coïncidant avec le maximum de différenciation).

2/ - Interprétation géomorphologique.

Elle est en partie déduite des observations faites sur le modelé et sur la disposition des niveaux indurés en moyenne Casamance, mais elle est d'abord tributaire des travaux effectués dans d'autres disciplines sur un secteur plus étendu.

Les travaux de synthèse les plus importants et les plus récents à ce sujet sont ceux de MICHEL (1959 - 60 - 64 - 67 - 69 - 70).

Selon cet auteur, la formation du relief de plateau, caractéristique d'une grande partie de la Casamance et de la Gambie, résulte de l'entaille de la surface de remblaiement, qui correspond au sommet du "Continental terminal" couvert de la cuirasse formée à la fin du Pliocène, par les principaux cours d'eau.

Le tracé des fleuves aurait été influencé par les accidents tectoniques survenus durant la période quaternaire. En ce qui concerne la Casamance, il s'agirait d'un mouvement de subsidence, particulièrement sensible dans le secteur littoral, faisant rejouer de vieilles fractures (fig. 1-4).

Au sujet de l'âge de ces déformations, MICHEL (1970) écrit que "ces gauchissements ont pu commencer dès le quaternaire ancien, mais qu'ils se sont produits surtout après la constitution du niveau cuirassé inférieur". Certaines discontinuités observées dans les grès du "Continental terminal" sous forme de niveaux indurés semblent donc avoir été affectées par les mouvements tectoniques.

Le creusement des vallées, guidé par ces déformations, se serait effectué par saccades lors des périodes les plus sèches favorisant l'érosion mécanique et se serait arrêté dès que le climat redevenait plus humide.

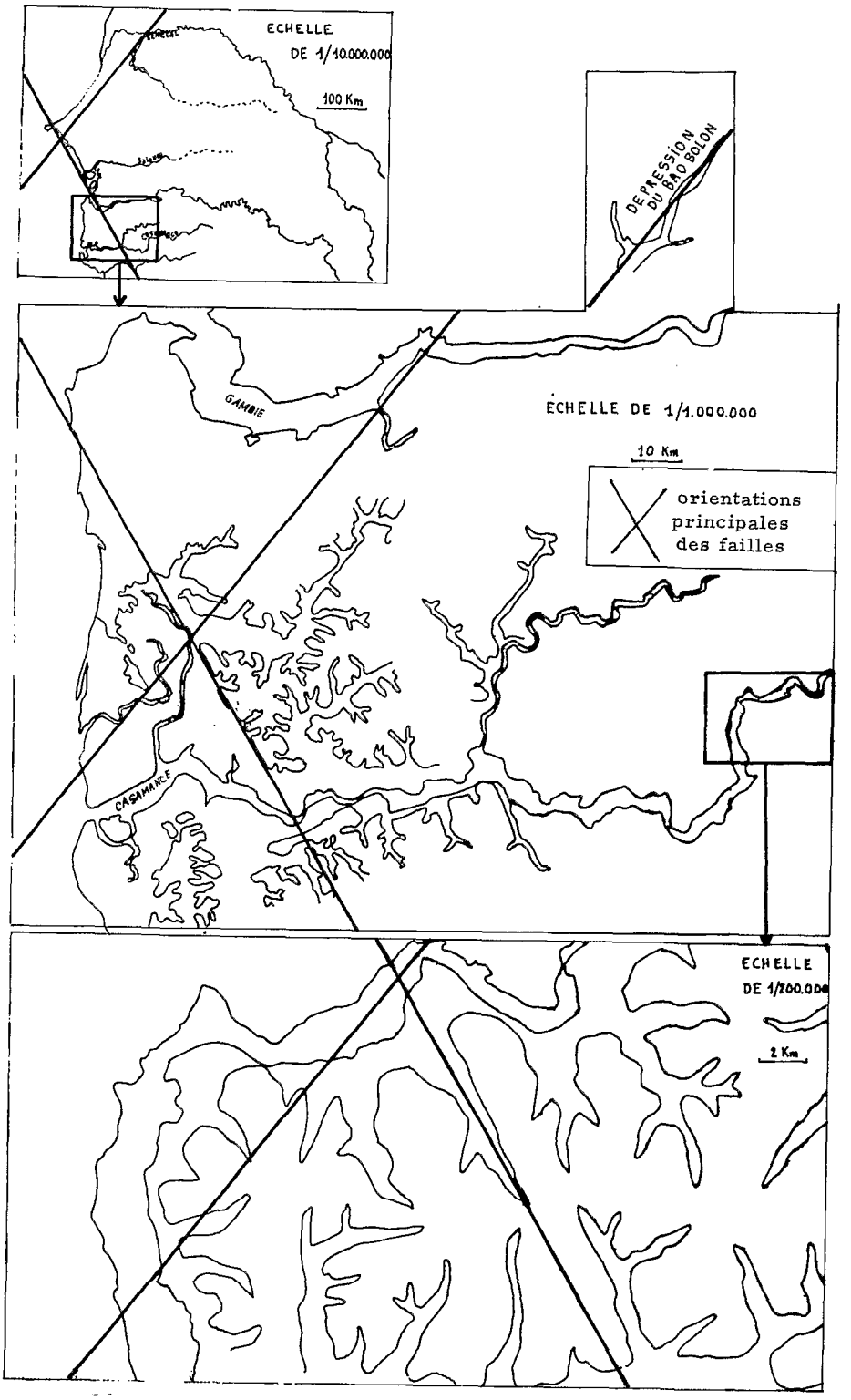


Fig. 1-4 - Orientation des failles à différentes échelles.

A propos de la différenciation latérale et de l'évolution ultérieure des niveaux indurés, MICHEL (1970) écrit encore que "les cuirasses qui engendrent la topographie en marches d'escaliers, dans la profonde entaille de la Sima (affluent de la rive gauche de la Gambie), s'amenuisent en s'éloignant des vallées et peuvent se terminer en biseau à l'intérieur des grès du "Continental terminal". C'est pourquoi il n'existe généralement qu'un seul niveau de cuirassé dans la zone de partage des eaux entre la Gambie, la Kayanga et la Casamance". De même "on n'observe qu'un seul niveau de cuirasse ferrugineuse le long de la côte, aussi bien à l'embouchure du fleuve Gambie, que dans les falaises au sud-ouest de son estuaire, alors que les coupes dans l'arrière-pays présentent généralement deux niveaux cuirassés. Deux hypothèses peuvent être envisagées : ou bien il ne s'est formé (dans cette région) qu'une cuirasse tout au long du quaternaire, ou bien la cuirasse supérieure a été érodée". Compte tenu des données morphologiques, MICHEL considère la deuxième hypothèse comme étant la plus probable.

Des travaux plus récents minimisent la signification génétique de l'étagement apparent des cuirasses, observé ici en bordure de plateau. Ainsi LEPRUN (1971) observe en Haute-Volta la disparition rapide des horizons indurés vers l'aval sous l'effet d'un démantèlement sur place et croissant vers la base, par "fonte" : "fissuration et fragmentation des horizons indurés au sein ou/et à la base de la cuirasse sont associés à une structure qui suggère une exportation de la fraction fine (vides interstitiels dans le réseau ferrugineux, avec dépôts de sables fins à structure pelliculaire)". Des phénomènes de "lavage" entraînant la redistribution des éléments fins sont également décrits par KALOGA (1972). Il se pourrait donc que les gradins cuirassés observés en moyenne Casamance soient le résultat d'une telle évolution, par soutirage et effondrement sur place. (La patine noire et l'arrondi des éléments indurés seraient ainsi formés lors d'une évolution par "fonte" et non à la suite d'un transport).

Grâce à des études piézométriques BERTRAND (1973) aborde l'étude de la dynamique actuelle des niveaux indurés de la région de Sédhiou (moyenne Casamance). Il constate que les fluctuations de la nappe dans les sables gris "délavés" situés en contrebas de l'affleurement ne peuvent être expliqués que par une alimentation à partir des niveaux cuirassés situés à

l'amont, dans lesquels l'eau s'infiltre et s'écoule latéralement, et par une circulation plus lente des nappes vers le fleuve au sein des formations sableuses d'origine alluviale.

Ces dernières observations mettent donc en évidence des caractères et des mécanismes de différenciation morphologique latérale, discernables sur le versant des vallées. Notre problème est de savoir si ceux-ci interviennent également dans la différenciation des sols rouges et beiges qui occupent la surface du plateau. Les niveaux indurés y sont localisés à des profondeurs telles (15 à 25 mètres) qu'il est difficile d'en effectuer l'étude morphologique et dynamique. Seules peuvent alors nous renseigner les données obtenues par les hydrogéologues.

3/ - Conclusions.

Trois faits retiennent plus particulièrement l'attention :

- En ce qui concerne le modelé, la région étudiée est caractérisée par la transition entre les reliefs de plateau dominants au nord et les interfluves à profils convexes qui se généralisent au sud.

- Les matériaux originels des sols présentent des variations dans l'espace liées à l'histoire géomorphologique. Il ne s'agit donc pas d'un grès uniforme, mais de formations déjà différenciées dont les organisations sont susceptibles d'être transmises au sol par héritage.

- Les observations faites révèlent que cette différenciation est latérale, à la périphérie des plateaux, et qu'elle semble liée à un écoulement d'eau dans ou sous les niveaux cuirassés.

Ceci nous conduit à aborder l'étude des eaux de profondeur et de surface.

C - EAUX DE PROFONDEUR ET DE SURFACE.

1/ - Les nappes et leur fonctionnement actuel.

a) Nappes permanentes.

Elles ont été étudiées par les hydrogéologues. GOUZE (1969), dans une étude de la Casamance, constate que les formations du "Continental terminal" contiennent une nappe aquifère continue dont le toit n'est jamais à plus de 30 mètres de profondeur sous la surface du sol.

Les oscillations de cette nappe phréatique se font selon un rythme saisonnier. Leur amplitude varie en fonction de la pluviosité annuelle et de l'emplacement des puits. Elle est généralement inférieure à 3 mètres pour les puits situés sur les plateaux de moyenne Casamance, plus couramment de l'ordre de 1 à 2 mètres. Le niveau maximum est atteint peu après les dernières pluies, en octobre-novembre.

En ce qui concerne le puits 1231, situé à proximité de Soukoutoto, dans la région de Séfa, l'amplitude de la fluctuation a atteint presque 3 mètres en 1958 pour une pluviosité de 1743 mm ; elle a été par contre voisine de 1 mètre en 1959 pour une pluviosité de 997 mm.

Utilisant la méthode d'interprétation graphique des crues de la nappe en fonction de la pluviosité annuelle proposée par HUBERT (1917-1922) et utilisée par DEGALLIER (1963-64), GOUZE (fig. 1-5) porte en abscisse les hauteurs annuelles de pluie et en ordonnée les amplitudes de crues. Il obtient alors une droite dont la pente est fonction de la porosité du terrain et dont la valeur de l'abscisse à l'origine correspond à la pluviosité nécessaire pour une remontée nulle, donc à la quantité d'eau qui ne parvient pas à la nappe. Cette valeur est la somme de l'eau ruisselée, retenue par les terrains pour reconstituer leurs réserves en eau et évapotranspirée.

Cette interprétation n'a qu'une valeur relative puisqu'elle suppose qua la quantité d'eau perdue annuellement est indépendante de la pluviosité totale annuelle (ce qui n'est vérifié que très approximativement à Séfa ; DANCETTE, 1973). Elle permet cependant d'établir des comparaisons : ce seuil atteint en effet des valeurs très différentes selon les cas, de l'ordre de 250 à 300 mm à Kaolak (Sine Saloum), de 400 à 700 mm à Kolda, de 600 à 1000 mm à Séfa et de 650 à 900 mm à Sedhiou (moyenne Casamance), de

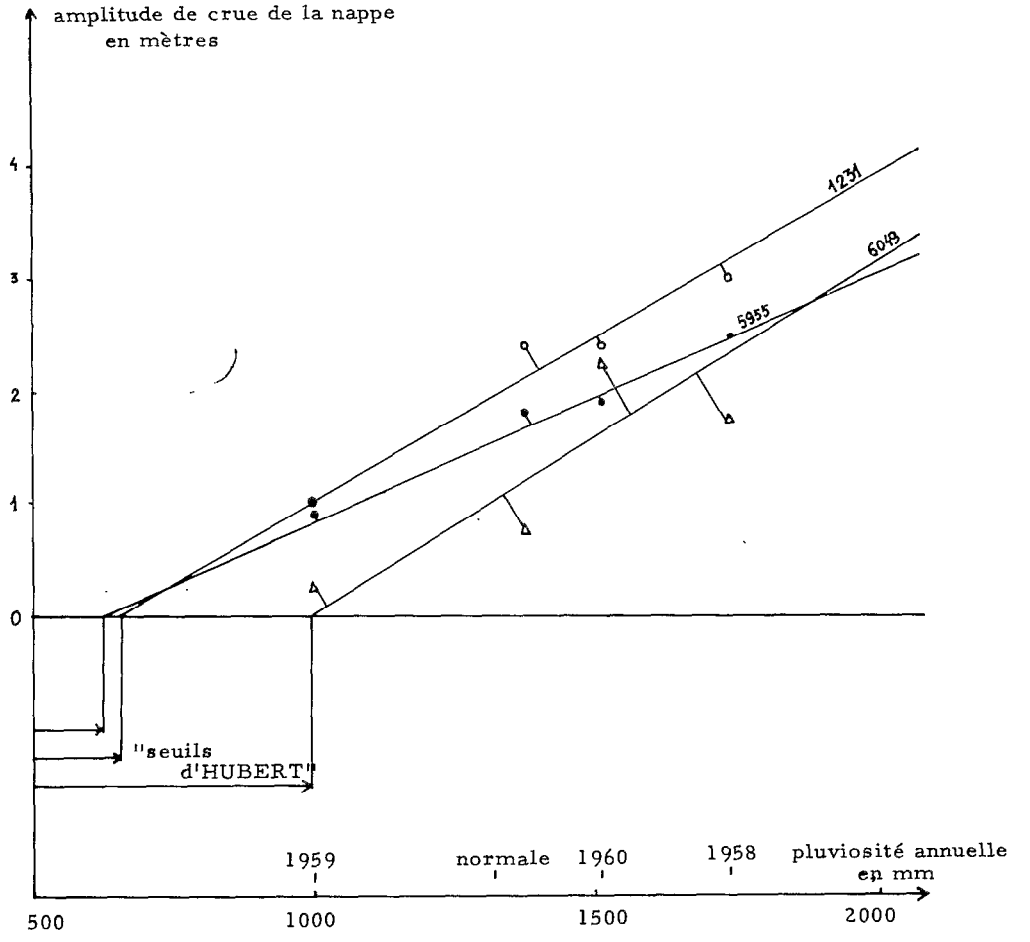


Fig. 1-5 - Interprétation graphique des crues des nappes phréatiques pour 3 puits de moyenne Casamance (selon GOUZE - 1969).

800 à 1000 mm à Oussouye (basse Casamance).

Etudiant l'ensemble des données ainsi obtenues pour les puits de Casamance, GOUZE constate que ces valeurs de seuil sont en relation avec le couvert forestier : elles sont en effet les plus fortes dans les régions humides à végétation arborée dense. Ceci semble montrer que la forêt casamançaise limite le drainage profond et l'alimentation de la nappe.

Cette influence est illustrée par l'exemple de Séfa cité par CHARREAU et FAUCK (1970). Une vingtaine d'années après le défrichement de cette région, le niveau de la nappe s'était élevé de 8 mètres donnant naissance, dans une vallée entaillant le plateau déboisé, à une source débitant 300 à 500 litres/seconde pour un bassin versant de l'ordre de 20 km^2 (en supposant un débit constant de 300 litres/seconde, ceci correspondrait à une hauteur d'eau de l'ordre de 0,5 mètre/an). Toutes les vallées entaillant le plateau déboisé, qui étaient autrefois à sec dès le mois de décembre sont maintenant en eau toute l'année, tandis que les vallées voisines dont les bassins sont entièrement boisés, ne présentent pas de modification dans leur régime d'écoulement. Nous reviendrons sur l'explication de ces faits lors de l'étude de la végétation et du climat. Retenons seulement qu'en moyenne Casamance, la déforestation accroît fortement l'alimentation en eau de la nappe.

L'écoulement latéral de cette nappe est, pour une part, dépendant de la perméabilité des matériaux étudiée par les hydrogéologues. NAPIAS (1967) constate que lorsque les puits atteignent des niveaux aquifères dans la "latérite", c'est-à-dire dans les niveaux indurés, fossiles ou actuels, la perméabilité, très importante (de l'ordre de 10^{-3} m/s), permet d'obtenir, surtout si l'aquifère est soutenu par un marigot, des débits très élevés pour un rabattement très faible. Cet auteur ajoute que cette forte perméabilité semble être due à une porosité de chenaux et que la "latérite" se comporte à peu près de la même manière que des calcaires karstiques. Dans tous les cas observés, les niveaux "latéritiques" (la cuirasse de surface exceptée) sont le siège de circulation préférentielle et interviennent comme des drains. Leur dénoyage à l'étiage provoque une baisse de débit importante dans les puits qui les captent. De telles constatations confirment le rôle que nous étions tentés d'attribuer aux niveaux indurés (fossiles ou non) dans la dynamique actuelle.

Lorsque le niveau aquifère des puits est contenu dans des formations du "Continental terminal", en dehors des niveaux latéritiques, les perméabilités varient en fonction de la texture du matériau : de l'ordre de 5 à 10^{-5} mètres/seconde dans les zones argileuses, elles atteignent 5 à 10^{-4} dans les zones sableuses.

Bien que les perméabilités de tous les matériaux du "Continental terminal" soient fortes ou très fortes, GOUZE constate que l'écoulement des nappes dans ces formations est faible (ceci est confirmé par les mesures hydrologiques citées plus loin). Il attribue ce fait à l'importance de la quantité d'eau qui ne parvient pas à la nappe permanente.

b) Nappes temporaires.

Elles sont plus localisées et ont été surtout étudiées à l'occasion d'études pédologiques. En bordure des vallées, dans les sables gris situés en contrebas des niveaux cuirassés, BERTRAND (1973) observe, dans 5 chaînes de sols, des nappes caractérisées par un régime de fluctuations, indépendantes des variations de niveau du fleuve et de la remontée progressive de la nappe permanente du "Continental terminal" : montée, d'abord lente durant la fin du mois de juillet et le début du mois d'août, puis très rapide (1 mètre en 7 jours, en moyenne, 1, 5 mètre au total) pendant la deuxième quinzaine d'août, puis maintien à un niveau élevé jusqu'aux dernières pluies, enfin abaissement progressif au cours de la saison sèche. Le toit de cette nappe, incliné vers l'aval, indiquerait un écoulement vers le fleuve. Selon les calculs effectués par BERTRAND, le régime observé ne peut être expliqué que par une alimentation latérale de la nappe à travers la cuirasse jouant le rôle de drain. Il estime que cette eau provient essentiellement de l'infiltration de la pluie dans les sols gravillonnaires qui surmontent la cuirasse. Il est vraisemblable que les eaux collectées par la cuirasse, plus en amont participent également à cette alimentation. Il apparaît ainsi que les niveaux cuirassés soustraient à l'alimentation de la nappe permanente dans la zone de plateau des quantités d'eau qui sont, pour partie évapotranspirées par la végétation qui couvre les sables gris, pour le restant transmises aux cours d'eau par l'écoulement de ces nappes fluctuantes. Ces conclusions rejoignent celles de NAPIAS qui estime que "le seul moyen d'utiliser les énormes quantités d'eau actuellement gaspillées par la végétation arborée

est de remplacer celle-ci par des cultures dans les secteurs où la nappe se trouve à faible profondeur, c'est-à-dire dans les vallées.

Sur le plateau, des sondages à la tarière, effectués selon une toposéquence, aux différents stades d'une année climatique normale (1964 - pluviosité 1 406 mm), parfois jusqu'à 7 mètres de profondeur, pour étudier les profils hydriques (CHAUVEL et TOBIAS) n'ont jamais rencontré de nappes perchées, aussi fugaces soient elles. Ces sondages étaient arrêtés cependant, dans tous les cas, à la partie supérieure des niveaux indurés.

2/ - Ruissellement superficiel et hydrologie.

En ce qui concerne le ruissellement superficiel, les études en cases d'érosion menées de 1954 à 1963 (ROOSE 1967), puis par CHARREAU et al. de 1964 à 1968 fournissent des données que nous reprendrons à propos de la végétation. Retenons seulement que sous couvert forestier intact, ou même brûlé, le ruissellement est toujours très faible ou même nul (coefficient 1 %), tandis qu'il s'accroît fortement sous jachère et culture (respectivement 17 % et 21 %) et plus encore lorsque le sol est dénudé (39, 5 %). Or, nous observons sur les plateaux de Casamance, même lorsque ceux-ci sont encore presque totalement boisés, des chenaux saisonniers, résultant de la jonction de petits thalwegs, qui entaillent les versants cuirassés pour rejoindre les cours d'eau. Un écoulement important y intervient rapidement après les fortes précipitations et s'interrompt quelques heures plus tard.

Pour expliquer cette contradiction entre l'absence de ruissellement mesuré dans les cases d'érosion sous couvert forestier et l'écoulement dans les chenaux, il faut faire intervenir, soit une question d'échelle (le ruissellement n'interviendrait pas de la même façon sur une parcelle de quelques dizaines de mètres de dimensions ou sur de vastes plateaux), soit encore un ruissellement hypodermique rapide qui ne serait pas collecté par le dispositif des cases d'érosion.

3/ - Composition chimique des eaux.

L'étude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouest, effectuée par le B.R.G.M. (1967), a montré que celles de Casamance

étaient très peu chargées en éléments minéraux : résidu sec généralement inférieur à 150 mg/litre (parfois inférieur à 40 mg/litre) sauf dans les zones influencées par les remontées marines anciennes ou actuelles.

L'anion prépondérant est, dans la plupart des cas CO_3H^- provenant sans doute du gaz carbonique de l'air. Il arrive que l'ion NO_3H^- soit assez largement représenté, en liaison avec la présence de cuirasse et d'une couverture végétale importante et continue (décomposition de la matière organique ?).

Les cations sont principalement K, Mg, Ca, Na qui sont l'un ou l'autre prépondérant selon les zones ; leur origine serait, dans bien des cas, liée à la proximité du socle ou du substratum éocène.

La silice est relativement bien représentée (bien que peu abondante en valeur absolue) puisque sa teneur dans 56 échantillons d'eau prélevés en Casamance varie entre 6 et 25 mg/litre (inférieure à 10 mg/litre dans 5 % des cas, comprise entre 10 et 15 mg/litre dans 70 % des cas, supérieure à 15 mg/litre dans 15 % des cas). Il s'agit en fait de "silice totale", qui peut comporter certaines fractions colloïdales, les teneurs en silice réellement dissoute étant alors moindres.

Les valeurs les plus élevées correspondent à des puits situés dans des zones où dominent les cuirasses, intactes ou démantelées. Les autres points de prélèvements sont trop peu nombreux ou trop localisés pour qu'il soit possible d'attribuer une signification à leur répartition .

Selon les travaux de FAUCK (1970-72) et de MILLOT (1970), cette silice proviendrait essentiellement de la dissolution des quartz lors de sa percolation à travers les sols : celle-ci se poursuivrait tant que la teneur en silice dissoute reste inférieure à 6 mg/litre.

En supposant le cas d'une alimentation de la nappe par percolation verticale à travers les sols, au cours de laquelle se produirait la dissolution du quartz et la formation de complexes silico-ferriques colloïdaux, les teneurs décelées dans les eaux correspondraient, pour une hauteur d'eau de 100 mm, à des quantités de silice exportées du sol comprises entre 2,5 g/m^2 ou 2,5 g/m^3.

Le pH des eaux de la nappe mesuré "in situ" est compris entre 4,5 et 5 dans 10 % des échantillons prélevés, entre 5 et 6 dans 70 % et supérieur à 6 dans 20 % de ces échantillons. On a donc une prédominance d'eaux

légèrement acides. Pour ce qui est des potentiels d'oxydo-réduction, les valeurs de Eh, exprimées en millivolts, sont comprises entre + 80 et + 100 dans 25 % des cas, entre + 100 et + 150 dans 68 %, entre 150 et 200 dans 7 %. Ces mesures révèlent un caractère réducteur assez accusé, compatible avec une certaine concentration en fer ferreux.

Les teneurs en fer, mesurées "in situ" restent pourtant très faibles. Elles peuvent être regroupées en deux ordres de grandeur : inférieures ou égales à 0,1 mg/litre dans les eaux des puits dont l'aquifère est situé dans les formations du "Continental terminal". Ces concentrations correspondraient, pour une hauteur d'eau de 100 mm, à des quantités de fer comprises entre 10 et 50 milligrammes par mètre carré.

4/ - Conclusions.

L'étude des eaux, profondes et de surface, met en évidence certains caractères du milieu dans lequel évoluent les sols :

- Il s'agit d'un milieu drainant. La perméabilité des matériaux profonds est, en effet, forte (grès du "Continental terminal") à très forte (niveaux cuirassés).

- Cependant une grande partie de l'eau reçue par les sols ne parvient pas à la nappe (400 à 1000 mm). Elle semble être dépendante de l'importance de la couverture arborée qui contrôlerait ainsi le drainage par des mécanismes dont nous allons aborder l'étude.

- Il apparaît également que les niveaux cuirassés peuvent soustraire au drainage profond de l'eau qu'ils acheminent latéralement, par leurs chenaux, vers les nappes fluctuantes des vallées.

- Les caractéristiques chimiques des eaux de la nappe montrent qu'il s'agit également d'un milieu lixiviant : légèrement acides, ces eaux se sont très peu chargées en éléments minéraux lors de leur percolation à travers le sol. Un des éléments les plus représenté y est la silice, tandis que le fer reste peu abondant.

Chapitre 2

LA VÉGÉTATION, LE CLIMAT ET L'ACTION DE L'HOMME

A - VEGETATION NATURELLE DE MOYENNE CASAMANCE.

Forêt claire, sèche, de type soudanais, la végétation naturelle de moyenne Casamance n'est jamais totalement dépourvue de ses feuilles durant la saison sèche. Presqu'en tout lieu elle arrête le regard, limite l'horizon, masque ou simule les lignes de relief et constitue, de ce fait, l'élément dominant du paysage.

Deux caractéristiques, apparemment contradictoires, lui sont particulières :

- Sa monotonie floristique. Elle est telle qu'il est impossible au botaniste d'y reconnaître des associations élémentaires. Ceci incite TROCHAIN (1940) à considérer qu'il s'agit d'un "groupement végétal à aire minima très vaste, non scindables en unités inférieures". Cette monotonie résulte en fait, selon AUBREVILLE (1948) d'une grande complexité : aux essences considérées comme autochtones (Ptérocarpus erinaceus et Parkia biglobosa) s'ajoutent en effet de nombreuses espèces que l'on trouve dans les forêts claires de haute Gambie. Toutes présentent le caractère commun d'être relativement résistantes au feu ; aucune n'apparaît exclusive des autres (1).

---

(1) Font seuls exception à cette règle les boisements de Daniellia olivieri (espèce à fort pouvoir de drageonnement qui serait devenue dominante sur d'anciens défrichement culturaux) et les associations qui correspondent à des conditions édaphiques particulières : cuirasses affleurantes ou "Bowés" (exceptionnels en moyenne Casamance) et fonds de vallées humides occupés par des peuplements azonaux d'origine sub-guinéenne.

- Sa diversité physionomique. AUBREVILLE note "la rapidité avec laquelle, en suivant une route, on passe d'un paysage forestier à l'autre, alors que le climat n'a pas de variation brusque, et que le sol apparemment est le même". Cette diversité serait la conséquence de feux et des défrichements culturaux dont l'action aurait entraîné "une bien plus grande modification de la végétation que de la flore" (TROCHAIN, 1941). Les formes observées correspondraient donc à des degrés divers d'"abatardissement" de la forêt primitive.

Dans cette forêt se reconnaissent 3 strates, inégalement développées selon les lieux :

- La futaie est remarquable par la présence de grands arbres espacés atteignant 15 à 20 mètres de haut. TROCHAIN (1941) constate que nulle essence n'est dominante, ou que si elle l'est dans un périmètre donné, à côté, malgré l'apparente identité des conditions écologiques, c'est une autre qui la remplace. Cette futaie est, en fin de saison sèche, par endroit verdoyante, ailleurs totalement défeuillée. AUBREVILLE attribue aux variations des réserves en eau dans les sols ces différences d'état. Il semble que ces réserves soient dépendantes à la fois des caractéristiques des sols et de la date du passage des feux qui commande à la fois l'interruption de la végétation herbacée et l'atteinte portée aux fûts des grands arbres ou même à leurs frondaisons (d'autant plus importante que les feux sont tardifs).

- Les sous-bois arbustifs sont plus dépendants de l'action de l'homme. Déjà présents dans la forêt claire, ils se développent avec une grande rapidité sur toutes les défriches abandonnées qui se couvrent, en quelques années, d'un taillis de Combretum et de Terminalia. D'autres espèces semblent, en revanche, être victimes de la surexploitation par l'homme, il s'agit en particulier des bambous (Oxythénanthera abyssinica).

- Le tapis herbacé, composé principalement de grandes andropogonées et, dans les clairières et les jachères, de Pennisetum, est sous la dépendance de l'éclairage du sol, lui même commandé par la densité du peuplement arboré. Aliment de prédilection des feux, il contribue, en cela, à diminuer cette densité et donc à accroître ses propres possibilités de développement, faisant évoluer le paysage vers la savane, évolution contrecarrée par le dynamisme de la végétation arborée, lié aux conditions climatiques.

Conclusions.

La monotonie de la composition floristique révèle l'homogénéité des conditions permanentes de milieu. On remarque, en particulier, l'absence de toute végétation à caractère particulièrement acidophile ou basophile. Certes, l'introduction d'espèces venant de régions plus sèches, signalée par les botanistes, semble indiquer une aridification du climat, mais on constate qu'elles sont étroitement mélées aux espèces autochtones et qu'il est donc impossible de définir, à partir de la végétation, des milieux écologiquement distincts.

Quelques anomalies signalent peut-être une microhétérogénéité des conditions hydriques : on note en particulier la présence d'essences considérées comme caractéristiques des terrains humides disséminées sur l'ensemble des plateaux, même dans des zones apparemment bien drainées.

Enfin et surtout, la diversité des paysages forestiers semble indiquer la vulnérabilité des équilibres réalisés entre le milieu climatique et la végétation, sur une période de quelques années. Les feux, fréquemment utilisés par l'homme, suffisent à perturber cet équilibre, de façon différente selon que leur passage se situe au début ou en fin de saison sèche. Le problème est de savoir comment se reconstituent les équilibres naturels ainsi modifiés.

B - CLIMAT.

La forêt sèche de Casamance s'étend, ou se maintient, dans un domaine climatique, dénommé tropical sud-soudanien par BRIGAUD (1965), caractérisé par l'alternance d'une courte saison pluvieuse (5 mois, de juin à octobre) durant laquelle les précipitations sont abondantes (900 à 1500 mm) et les vents humides de secteur sud-ouest, et d'une saison sèche plus longue (7 mois, de novembre à mai), absolue, rendue plus rigoureuse encore par la fréquence des vents secs continentaux, soufflant du nord-est. (L'humidité relative atteint alors, en zone découverte, des valeurs inférieures à 18 %, comparables à celles qui sont mesurées en zone sahelienne).

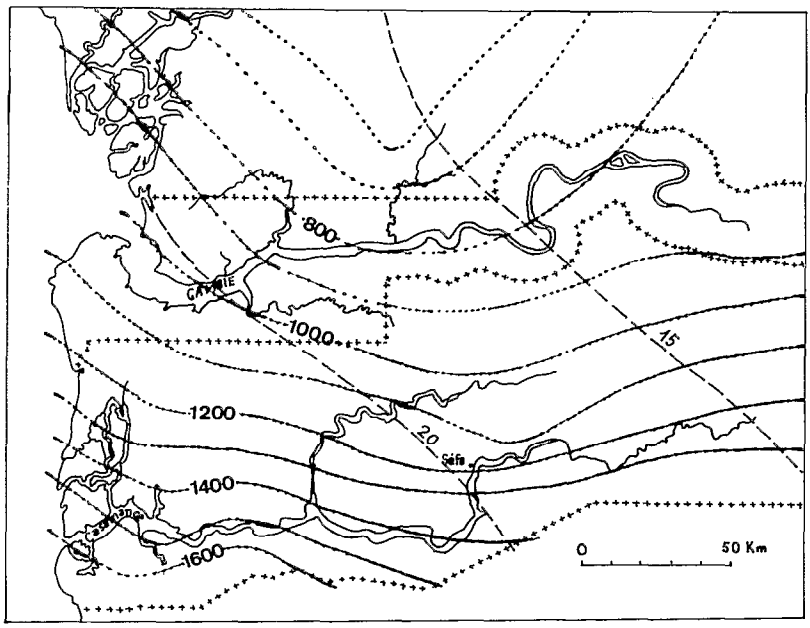


Fig. 2-1 - Isohètes normales trentenaires (selon GOUZE, 1969) ———
humidités relatives (moyenne des minimas en mars) — — —

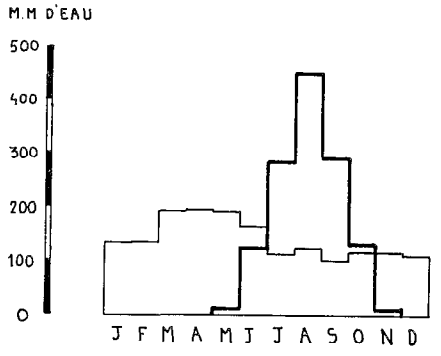
1/ - La pluviosité.

La pluviosité commande l'évolution de cette couverture végétale. Plus au nord, dans la région du Sine Saloum, sur un matériau pourtant comparable, une pluviosité sensiblement inférieure ne permet pas à la forêt de se régénérer dans les mêmes conditions. Plus au sud, à l'opposé, lorsque la pluviosité augmente, on passe à la forêt dense humide du domaine subguinéen.

Ses variations dans l'espace sont caractérisées par un gradient pluviométrique Nord Sud élevé : entre les isohyètes 900 et 1600, la distance est de l'ordre de 100 kilomètres, le gradient moyen est donc de l'ordre de 100 mm pour 15 kilomètres (fig. 2-1). Les données relatives à la station de recherches agronomiques de Séfa sont représentatives de la région : la pluviosité moyenne, influencée par des valeurs maximales supérieures à 1700 mm, y est égale à 1397 mm pour la période 1950-1970 (tandis que la "normale trentenaire" est voisine de 1200 mm). Ces données sont aussi les plus complètes en ce qui concerne les éléments du bilan hydrique. C'est donc à elles que nous ferons référence.

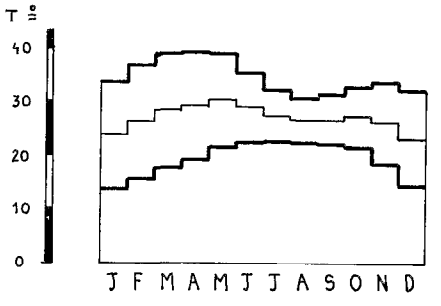
Ses variations dans le temps sont d'abord caractérisées par de fortes variations interannuelles : 963 mm en 1957, 1743 mm en 1958, 997 mm en 1959, 607,3 mm en 1968. Elles le sont également par l'irrégularité de la répartition au cours de la saison des pluies. Si celle-ci s'étale en général sur près de 5 mois, il arrive cependant fréquemment que les premières précipitations devancent de quelques semaines l'établissement d'un régime humide permanent, elles sont alors rapidement évaporées et n'interviennent ni sur la végétation, ni, à plus forte raison, sur le drainage. Pour cette raison les bioclimatologues agronomes (DANCETTE, 1973) appellent "hivernage utile" la période qui s'étend entre le moment où la pluviométrie atteint 40 mm et les dernières précipitations totalisant plus de 20 mm. Selon eux, cette période est en moyenne de 129 jours à Séfa.

La répartition moyenne des pluies au cours de l'année est représentée par l'histogramme de la figure 2-2. Elle est caractérisée par un maximum important au mois d'août (450 mm, soit 32 % de la pluviosité annuelle moyenne). Il arrive cependant que les plus fortes pluies se produisent en juillet (1954 : 452 mm, soit 36 % de la pluviosité annuelle) ou encore en



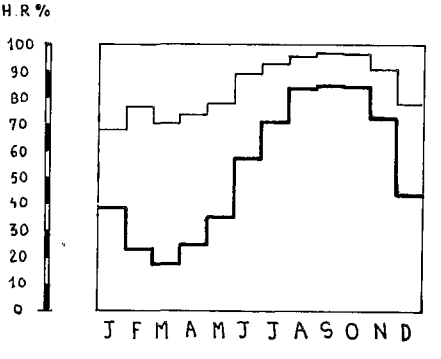
-Pluviosité: moyennes mensuelles (1950-1970)
-Evapotranspiration potentielle: moyennes mensuelles (1968-1970) selon DANCETTE(1973)

On distingue :
. une saison très humide(de juillet à septembre) durant laquelle la pluviosité est très supérieure à l'E. T. P.
. une saison sèche essentiellement déficitaire (de novembre à mai).



Températures moyennes mensuelles (1960-1970)
-maximales
- $\frac{\text{maxi+ mini}}{2}$
- minimales

L'amplitude des variations diurnes atteint sa plus forte valeur durant la saison sèche.



Humidités relatives de l'air : moyennes mensuelles 1966-1967
- à 8 heures
- à 18 heures

Durant les mois de février, mars et avril, l'humidité relative de l'air, sur un terrain découvert, atteint chaque jour des valeurs très faibles.

Fig. 2-2 - Histogrammes climatiques. (Station de SEFA).

septembre (1952 : 460 mm, soit 37 % de la pluviosité annuelle). Des pluviosités mensuelles de l'ordre de 450 mm sont fréquentes, elles peuvent aussi dépasser 700 mm, ou encore n'atteindre en aucun mois de valeurs supérieures à 321 mm (1957). Il est fréquent enfin d'observer, durant quelques jours, des successions de fortes pluies ou encore des périodes sèches intercalaires, se prolongeant parfois plus d'une semaine, même au cœur de la saison humide, sans aucune précipitation. Il est bien évident que cette irrégularité de la répartition des pluies exerce une action déterminante sur la végétation et sur le drainage des sols.

2/ - L'intensité des pluies et ses conséquences.

Considérée, non plus de façon cumulative pour une période donnée, mais enregistrée en fonction du temps à l'aide de pluviographes à augets basculants, l'intensité des pluies est une donnée rarement disponible mais qui présente un grand intérêt pour l'étude des conditions d'évolution du sol et de son couvert végétal. Il revient à CHARREAU et NICOU (1971) d'en avoir effectué des évaluations pour la station de Séfa (tableau 2-1).
On constate qu'à Séfa, la moitié des pluies annuelles tombe avec une intensité supérieure à 32 mm/heure, et le quart avec une intensité supérieure à 62 mm/heure. Des intensités plus élevées encore, supérieures à 100 mm/heure, sont relevées presque chaque année.

Ces intensités très fortes ont deux conséquences directes sur les sols :

1) les quantités d'eau tombées durant les fortes pluies peuvent être très supérieures à la capacité d'infiltration des sols. Il se produit alors un engorgement temporaire superficiel et le ruissellement peut intervenir même sur des pentes faibles et des sols perméables, entraînant une redistribution de l'eau à la surface du sol.

2) ces pluies correspondent à une énergie cinétique élevée qui, s'appliquant directement à la surface du sol (ou à sa couverture végétale) provoque un effet mécanique d'autant plus marqué que l'horizon superficiel se sature d'eau et qu'intervient alors l'effet de battance (HENIN et al., 1960). Les énergies cinétiques développées par les pluies durant les différents mois de l'année, calculées par CHARREAU et NICOU (1971),

Tableau 2-1.

INTENSITE ET ENERGIE CINETIQUE DES PLUIES A SEFA. LEUR UTILISATION POUR UNE APPRECIATION DE L'IMPORTANCE DE L'EROSION (SELON CHARREAU et NICOU, 1971).

		PERIODES					
		Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre Novembre	Année
Limite des quartiles des courbes	Q 1	9,0	13,9	7,0	9,2	9,3	8,9
mensuelles et annuelles de fréquences	Q 2	28,2	41,4	24,3	34,3	28,2	32,0
de pluie par classes d'intensité (mm/h)	Q 3	71,6	69,7	57,7	64,3	53,0	61,6
1965 - 1968							
Tranches de pluie (mm)		111,4	234,7	287,9	403,4	177,0	1214,4
Energie cinétique des pluies (en kgm/m^2) 1964-68		256,4	584,2	676,7	924,8	391,0	2833,3
"Index pluie" de WISCHMEIER 1964-1968		135,7	402,8	356,1	462,0	158,1	1524,5
Dégradation spécifique (selon WISCHMEIER) en tonnes/hectare							54,4
Moyenne de l'érosion maxima mesurée en tonnes/hectare							15,2

en utilisant la formule de WISCHMEIER et SMITH, sont regroupées dans le tableau 2-1. Elles s'élèvent au total, en moyenne à 2830 kg m/m^2/an à Séfa, pour la période 1964-1968 (soit une énergie qui serait suffisante pour élever la tranche superficielle de 2 mètres de sol à une hauteur de 1 mètre).

Elles sont à l'origine des processus d'érosion du sol. WISCHMEIER, ayant montré que l'énergie cinétique n'était pas le seul facteur à prendre en considération pour rendre compte de l'agressivité des pluies, a proposé un "index-pluie" qui fait intervenir également l'intensité maximum durant une période de 30 minutes. Les valeurs mensuelles moyennes de cet index, calculées par CHARREAU et NICOU (1971) pour la période 1964-68, pour 2 stations voisines de Séfa figurent au tableau 2-1. On constate que le maximum se situe en juillet, en relation avec la forte intensité des pluies qui caractérise le début de l'hivernage. La valeur annuelle est de 1524, 5 pour une hauteur d'eau égale à 1233, 6 mm. Le rapport : "index pluie"/pluie est alors de 1, 23 à Séfa, tandis qu'il s'élève à 1, 11 pour la station de Bambey (Sénégal) et à 0, 83 pour celle de Bouaké (Côte d'Ivoire). Les pluies de moyenne Casamance seraient ainsi caractérisées par leur très forte agressivité.

Ces évaluations sont très supérieures à la moyenne de l'érosion maxima mesurée en cases expérimentales qui, selon CHARREAU et NICOU s'élève à 15, 2 tonnes/ha/an (correspondant à l'ablation de 1 mm de terre/an).

Ce désaccord pourrait tenir à l'influence de la répartition des pluies par rapport au développement du couvert végétal, qui n'est pas prise en compte par la méthode d'évaluation. Quoi qu'il en soit, l'ensemble des résultats cités met en évidence la très grande agressivité des pluies dans la région étudiée.

3/ - Les équilibres pluviothermiques et l'évapotranspiration potentielle.

Ils exercent une action déterminante sur l'évolution du couvert végétal et sur les possibilités de drainage du sol.

Les moyennes mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes de l'air sont reportées sur le graphique (fig 2-2). On constate que les moyennes évoluent entre 24° et 30° et qu'elles présentent deux

valeurs minimales, l'une en saison sèche (décembre janvier : 24°), l'autre moins marquée au cœur de la saison des pluies (août : 26, 5°). L'amplitude des variations diurnes varie dans de plus larges proportions : minimale au mois d'août, elle atteint sa plus forte valeur durant la saison sèche (mars 21, 2°).

Les humidités relatives (mesurées à 8 h, 12 h et 18 h) sont également figurées sur le graphique. Elles mettent bien en évidence le contraste entre les deux climats alternés de saison sèche et de saison des pluies : le premier caractérisé par une très forte siccité atmosphérique, qui s'accentue au cours de la journée (humidité relative passant de 70 % le matin, à 18 % dans la soirée durant le mois de mars), le deuxième par une très forte humidité qui s'atténue faiblement aux heures les plus chaudes (passant de 95 % le matin à 78 % vers midi).

Les mesures d'évaporation (évaporomètre PICHE) confirment ce contraste : évaporation mensuelle supérieure à 300 mm en mars, n'atteignant pas 40 mm en septembre.

L'évapotranspiration potentielle constitue une donnée essentielle pour l'appréciation du bilan hydrique des sols. Il s'agit d'une donnée complexe qui peut être évaluée, soit par des mesures directes, plus ou moins approchées, soit encore par le calcul, en utilisant diverses formules.

Un dispositif de mesure a été mis en place à Séfa, dès 1965, (DANCETTE, 1973). On dispose donc pour cette région de données sûres, en bonne relation avec celles obtenues par le calcul. Les valeurs fournies sont représentées sur la figure 2-2 ; elles s'élèvent à 101 mm en septembre, 194 mm en avril, 1679 mm pour l'année (moyenne 1968 - 1970).

Elles sont, selon cet auteur, parmi les plus faibles du Sénégal durant la saison des pluies, (moyenne du total pour la période 1968 - 1970 égale à 532 mm, inférieures selon les mois de 52 % à 34 % à celles de Richard Toll, station située près de la frontière de Mauritanie) mais diffèrent peu de celles des stations les plus arides durant les mois les plus secs (moyenne du total 1147 mm, inférieures de 2 % à celles de Richard Toll en Janvier).

Confrontées aux valeurs de la pluviosité mensuelle, elles mettent encore en évidence l'opposition entre une période humide (juillet, août, septembre), durant laquelle la pluviosité est très supérieure à l'ETP (respectivement 1044 et 532 mm), et une période fortement déficitaire (de novembre

à mai), caractérisée par des valeurs de l'ETP fortes (1147 mm) et des pluies inexistantes, ce qui implique que l'alimentation hydrique de la végétation est alors seulement dépendante des réserves en eau du sol disponibles pour les plantes. Ceci nous conduit à examiner de plus près le problème de la relation entre le climat du sol et sa couverture végétale.

C - INFLUENCE DU COUVERT VEGETAL ET DE L'INTERVENTION HUMAINE SUR LE PEDOCLIMAT ET L'EVOLUTION DU SOL.

Nous allons envisager successivement les influences exercées :

- sur le régime thermique
- sur le régime hydrique
- sur le cycle biogéochimique.

1/ - Couvert végétal et régime thermique.

Les températures ont été relevées, à divers intervalles de temps, à l'aide d'une série de résistances électriques (à fil de platine), mises en place par CHAUVEL et TOBIAS en 1964, sous des couverts végétaux non perturbés, à 5 cm, 20 cm, 50 cm, 90 cm et 150 cm de profondeur (exceptionnellement à 300 cm).

Deux variations périodiques apparaissent de façon évidente, l'une journalière, l'autre annuelle (fig. 2-3 et 2-4).

L'amplitude de la première décroît progressivement, en changeant de phase, avec la profondeur : très élevée à 5 cm, elle s'annule sensiblement dès 90 cm, totalement à 1,5 mètre (graphique fig. 2-3). A 5 centimètres, l'amplitude des variations est près de 2 fois plus élevée en saison sèche qu'en saison des pluies. Dans les deux cas, les températures atteintes sont d'autant plus hautes que le sol est plus directement exposé aux rayons du soleil.

Ainsi, le 28 avril à 15 h, la température de l'air étant de 35°, celle relevée à 5 cm sous forêt était de 36,3°, sous surface enherbée de 44,2° et sur une surface laissée dénudée par une culture d'arachide, de 56,3° (fig. 2-5).

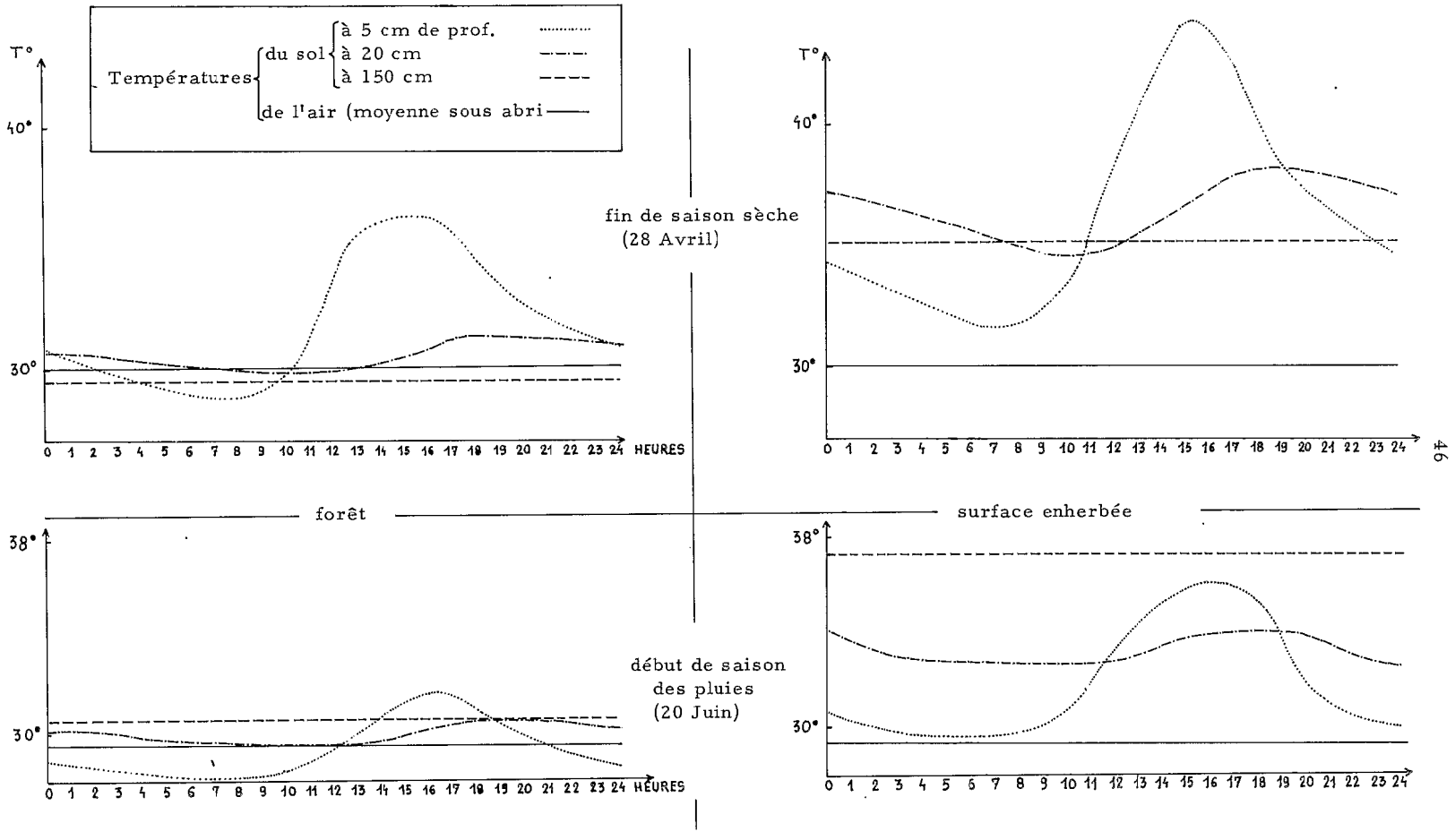


Fig. 2-3 - Variations journalières de la température du sol, sous différents couverts végétaux.

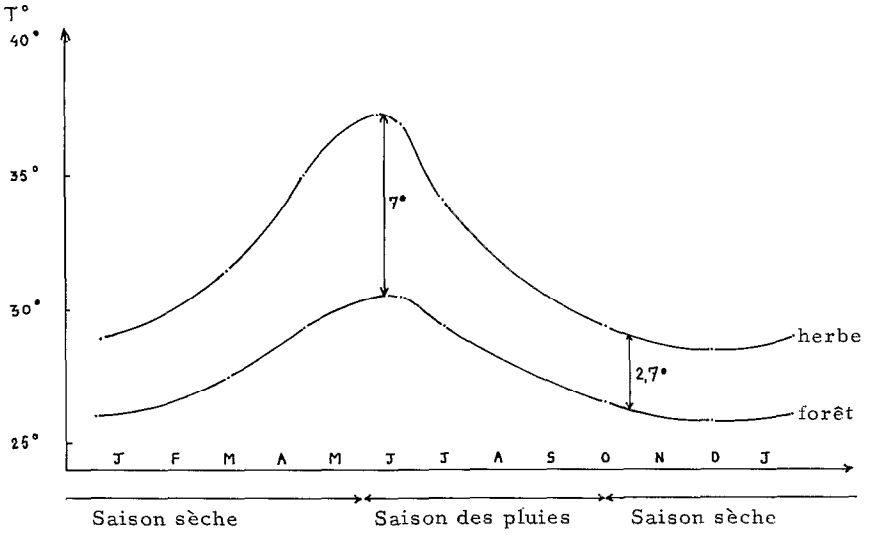


Fig. 2-4 - Variations annuelles de la température du sol sous différents couverts végétaux.

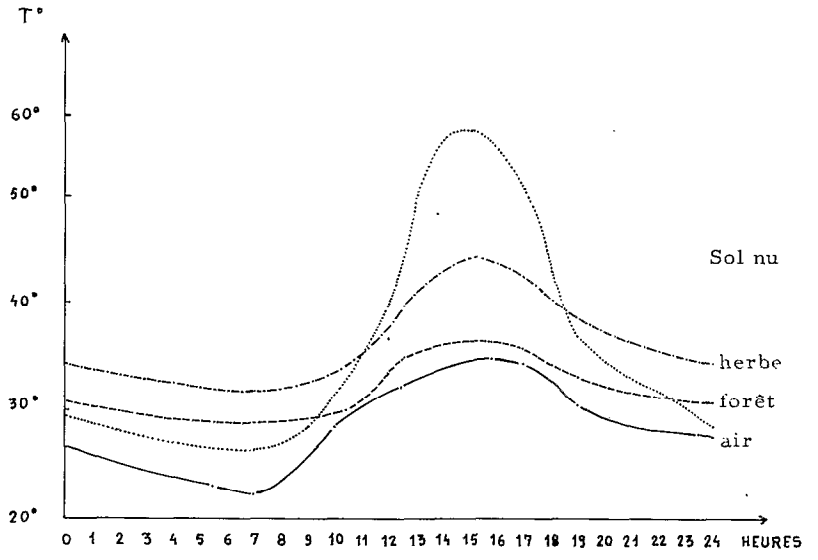


Fig. 2-5 - Variations journalières de la température du sol sous différents couverts végétaux (comparées à celles de l'air).

La variation annuelle est la seule décelable à 150 cm, son allure est encore grossièrement sinusoïdale (graphique fig. 2-4), déformée cependant par une décroissance rapide au début de la saison des pluies. Durant toute l'année, la température est, à ces profondeurs, sensiblement plus élevée dans les sols cultivés ou enherbés que dans les sols forestiers. La différence atteint un maximum de 7° au début de la saison des pluies, elle s'atténue ensuite progressivement pour n'être plus que de l'ordre de 3° lorsque commence la saison sèche.

Des différences de température comparables sont relevées dans la plus grande partie du profil pédologique, de 50 à 300 cm. Il en résulte que les conditions thermiques qui influencent les processus pédogénétiques, sont sensiblement différentes dans un sol cultivé ou enherbé de ce qu'elles sont sous couvert forestier.

Les différences sont beaucoup moins marquées en fonction de la nature du sol, qu'elles ne le sont en fonction de la couverture végétale : inférieures à 2° (toutes choses étant égales par ailleurs), elles expriment surtout un échauffement diurne plus important des horizons superficiels et une décroissance plus rapide de l'amplitude des variations journalières avec la profondeur dans les sols rouges, qui seraient ainsi caractérisés par une conductivité thermique plus faible que celle des sols beiges. Ces résultats sont en accord avec les observations de COINTEPAS (1960).

Ces variations de température entraînent l'apparition de gradients thermiques qui peuvent atteindre des valeurs élevées, plus particulièrement dans les sols cultivés (jusqu'à près de 10° par mètre entre 20 et 40 cm durant la saison sèche). Selon les heures et selon les saisons, ces gradients se continuent ou s'inversent dans les horizons du profil. Ils seraient susceptibles d'exercer une action sur la redistribution de l'eau (à l'état de vapeur) dans le profil et expliquent peut-être les accroissements d'humidité observés dans certains horizons durant la saison sèche.

2/ - Couvert végétal et régime hydrique.

a) L'influence du couvert végétal se manifeste en premier lieu sur les conditions d'infiltration de l'eau dans les horizons superficiels.

Sous végétation forestière, la plupart des gouttes de pluie sont inter-

ceptées par les feuilles, retombent de branche en branche sur les arbustes, puis s'écoulent le long des herbes pour pénétrer finalement dans le sol au voisinage de leurs collets. Dans ces conditions, l'énergie cinétique, aussi forte soit-elle, est considérablement amortie. Lorsqu'il est cultivé, le sol, dénudé au début de la saison des pluies, reçoit de plein fouet les premières précipitations (caractérisées par la plus forte proportion d'intensités élevées). La végétation qu'il porte ensuite ne le protège que partiellement de l'impact des gouttes de pluie. Sous culture dévastée , enfin, la protection offerte par la végétation est faible, voire inexistante.

Un autre facteur intervient, qui dépend des valeurs relatives de l'intensité des pluies et de la vitesse de pénétration de l'eau dans les sols. Lorsque les premières (qui peuvent être de l'ordre de 100 mm/heure) dépassent les secondes (ce qui est plus fréquent dans les sols cultivés qui présentent un niveau de compacité sub-superficiel, que dans ceux maintenus sous couvert forestier, plus poreux, voir chapitre 8), il se constitue une pellicule d'eau à la surface des éléments structuraux du sol. L'énergie cinétique des gouttes se répercute alors de point en point (effet "splash") entraînant la destruction des assemblages, manifestée par la redistribution des particules et par le développement d'une structure lamellaire. Celle-ci entraîne elle-même une diminution de la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol, et donc, lors des précipitations suivantes, une aggravation de l'engorgement superficiel. Ainsi s'explique la formation de flaques temporaires, puis de mares qui peuvent atteindre une dizaine de mètres de diamètre, fréquemment observées sur ces sols cultivés (mais non sur ceux maintenus sous couvert forestier). Lorsque les précipitations sont abondantes, ces flaques et ces mares peuvent se maintenir durant la plus grande partie de la saison des pluies.

b) Saturation superficielle et engorgement créent des conditions favorables au phénomène de ruissellement (et peut-être à un écoulement "hypodermique") et favorisent l'érosion.

Il suffit dans ces conditions de très faibles pentes pour qu'apparaisse un ruissellement superficiel, dont l'importance, mesurée en cuve d'érosion par ROOSE (1967) et par CHARREAU (1969), en fonction de la nature du couvert végétal est indiquée dans le tableau 2-2 : très faible sous forêt, elle

est multipliée sensiblement par 20 sous culture et par 40 sur sol nu.

Tableau 2-2.

INFLUENCE COMPAREE DES DIVERSES COUVERTURES VEGETALES SUR LE RUISSELLEMENT ET SUR L'EROSION - MOYENNES PONDEREES POUR LA PERIODE 1954 - 1968 - SELON CHARREAU et NICOU (1970).

Couverture végétale	Hauteur d'eau ruisselée (en mm)	Coefficient de ruissellement (%)	Erosion (tonnes/hectare)
Forêt	15	1,0	0,18
Jachère	200	16,6	4,88
Culture	264	21,2	7,31
Sol nu	456	39,5	21,28

Les coefficients de ruissellement augmenteraient fortement pour de faibles accroissements de pente ; ils passeraient ainsi, sous culture, de 16,3 % pour une pente de 1 %, à 21,9 pour une pente de 1,5 % et à 30 % pour une pente de 2 % (selon CHARREAU et FAUCK, 1970).

L'influence du couvert végétal est à ce point prépondérante, en ce qui concerne le ruissellement, qu'elle masque les différences qui pourraient apparaître entre sol beige et sol rouge, soit que les valeurs des coefficients soient trop faibles dans les deux cas pour servir de base à une comparaison, lorsqu'il s'agit de sol sous forêt, soit encore que les perturbations entraînées par la mise en culture et l'hétérogénéité qui en résulte aient, à ce point de vue, des conséquences plus importantes que celles des caractéristiques originelles du sol.

Ce ruissellement entraîne une redistribution de l'eau à la surface des sols et donc localement une aggravation de l'engorgement superficiel. Il est étroitement lié à l'état de la structure dans les horizons superficiels et se maintient lorsque le sol est mis en jachère et que s'y développe à nouveau une strate arbustive (tableau 2-2).

L'érosion semble être plus directement dépendante de la protection mécanique assurée au sol par la couverture végétale contre l'énergie ciné-

tique des pluies.

c) La couverture végétale exerce aussi une action déterminante sur le bilan hydrique des sols étudiés.*

Le bilan hydrique annuel, déduit des seules données climatiques, est largement déficitaire (1044 mm de pluie contre 1679 mm d'évapotranspiration potentielle par an, pour la période de 1968-1970). Il peut cependant être décomposé en deux bilans partiels (DANCETTE, 1973) : l'un de saison des pluies fortement excédentaire (1044 mm de pluie contre 532 mm d'évapotranspiration potentielle), l'autre de saison sèche entièrement déficitaire (1147 mm d'évapotranspiration potentielle). Entre ces deux bilans, l'effet compensateur est dépendant des réserves en eau du sol accessibles aux plantes qui reportent sur le début de la période déficitaire une partie de l'excédent disponible en saison des pluies.

Ces réserves sont en premier lieu fonction de la capacité du sol pour l'eau, mais celle-ci varie assez peu d'un sol à l'autre ; elles seront donc surtout liées à la profondeur d'enracinement qui détermine la fraction des réserves accessible aux plantes : atteignant ou dépassant 6 mètres pour une végétation forestière, celle-ci n'est que de 80 centimètres à 2 mètres pour une jachère ou une friche, et de 15 à 80 centimètres pour des cultures sarclées (CHARREAU et NICOU, 1971). Compte tenu de l'humidité volumique "utile" voisine de 6 %, cette réserve correspondrait à près de 360 mm pour une forêt, à 120 mm pour une jachère ancienne, et seulement à 48 mm pour une culture sarclée à enracinement profond.

Grâce à cette réserve, la végétation forestière se maintient plusieurs mois après les dernières pluies, limitant progressivement son évapotranspiration réelle qui devient très inférieure à l'évapotranspiration potentielle ; la persistance est plus brève dans le cas d'une jachère ; elle est limitée à quelques jours à quelques semaines après les dernières pluies dans les cultures sarclées (les horizons superficiels desséchés forment dans ce cas un "mulch" qui réduit jusqu'à l'annuler l'évaporation du sol).

---

* Cette influence sera mise en évidence, de façon quantitative, par l'étude du fonctionnement hydrique des sols, exposée dans le chapitre 8.

Lors de la saison des pluies suivante, une fraction variable de l'eau excédentaire sert d'abord à reconstituer les réserves en eau du sol.

La végétation intervient donc :

- sur le bilan hydrique global : l'évapotranspiration serait ainsi voisine de la somme : (E. T. P en période d'hivernage + réserves accessibles) soit, pour une forêt : 532 + 360 = 892 mm

pour une jachère ancienne : 532 + 120 = 652

pour une culture sarclée : 532 + 48 = 580 mm.

Ces différences expliquent aisément la remontée de la nappe consécutive à la déforestation du bassin versant de Séfa.

- Par voie de conséquence, sur l'excédent d'eau disponible au niveau des sols cultivés en saison des pluies qui peut, soit drainer et alimenter directement la nappe si la perméabilité est suffisante, soit encore provoquer l'engorgement des horizons superficiels et ruisseler.

- Enfin sur le régime hydrique durant la saison sèche : les sols portés progressivement à leur minimum d'humidité sur une grande profondeur lorsqu'ils sont sous couvert forestier, sont desséchés rapidement sur quelques décimètres sous culture, tandis que leurs horizons plus profonds sont maintenus à un niveau d'humidité supérieur.

3/ - Couvert végétal et cycle biogéochimique.

Par son influence sur les conditions pédoclimatiques et aussi par l'effet de la matière organique, le couvert végétal influence fortement le cycle biologique et, par voie de conséquence, le milieu biogéochimique dans lequel évolue le sol.

Sous forêt, le pédoclimat, caractérisé par des variations "tamponnées" de la température, par une humectation profonde pendant la saison des pluies, puis par une variation progressive de l'humidité, sur l'ensemble du profil, sous l'effet de l'exploitation des réserves en eau du sol par les plantes arborées arbustives et herbacées, favorise une activité microbiologique globale élevée (FAUCK, MOUREAUX, THOMANN, 1969).

La végétation arborée, exploitant le sol sur une grande profondeur, produit de la matière organique (feuilles et branchages) déposée à la surface

du sol, puis rapidement décomposée, d'abord par l'action des termites qui dévorent les éléments ligneux (et en tirent l'énergie nécessaire à leur action mécanique sur le sol), puis par l'activité microbiologique (particulièrement forte en début de saison des pluies). Le rythme de cette décomposition est tel que le stock de matière organique reste sensiblement constant (à un niveau assez faible) d'une année sur l'autre. Peu de données sont disponibles au sujet de cette production annuelle de litière par les arbres de la forêt casamançaise. Selon DOMMERGUES (1963), elle pourrait être de l'ordre de 5 tonnes/hectare/an pour les forêts de la zone tropicale semi humide.

L'apport souterrain, correspondant aux racines des arbres, arbustes et plantes herbacées, moins connu, n'est sûrement pas négligeable.

Cet apport annuel de matière végétale rapidement décomposée, serait la principale source d'éléments minéraux dans les horizons superficiels des sols étudiés. Maintenus sous végétation forestière, ces derniers ont généralement un complexe absorbant presque saturé par des bases échangeables, plus particulièrement par Ca^{++} et Mg^{++} (voir chapitre 7). Or celles-ci ne peuvent provenir directement des minéraux altérables très peu représentés dans le matériau. Il semble donc qu'elles soient concentrées par l'activité des arbres à partir du très vaste volume exploité par leurs racines, puis redistribuées au niveau des horizons superficiels par décomposition de la litière. Ceci est en accord avec l'observation faite par les agronomes qui notent une diminution importante des bases échangeables dans les sols de Séfa, au cours des années qui suivent la déforestation (CHARREAU et FAUCK,1970).

Des composés organiques hydrosolubles sont également issus de la décomposition de cette matière végétale. C'est ce qui résulte des travaux de YUNG, BRUCKERT et DOMMERGUES (1968) portant sur les litières issues de 3 essences représentées en Casamance (ou voisines de celles qui y sont représentées). Il s'agit de Guiera sénégalensis (combretacée), Khaya sénégalensis (méliacée) et Gmelia arborea (verbenacée). Elles contiennent toutes plus de 20 °/₀₀ de carbone sous forme hydrosoluble ; 27 à 47 % de ce carbone se trouve sous forme d'acides aliphatiques hydrosolubles, soit de 2 à 22 fois plus que dans les litières tempérées, y compris celles provenant d'essences considérées comme les plus acidifiantes.

Les quantités d'acides aliphatiques produites annuellement, par hectare, reportées dans le tableau 2-3, ont été calculées sur la base des résultats fournis par YUNG et al., en supposant que la production de litière soit égale à 5 tonnes/hectare/an.

Tableau 2-3.
PRODUCTION ANNUELLE D'ACIDES ALIPHATIQUES HYDROSOLUBLES
(en kg/ha)

Acides / Essences	lactique	succinique	malique	citrique	quinique	oxalique	TOTAL
GUIERA	4,3	1,9	0	2,5	40,5	0	49,2
KHAYA	11,3	9,8	34,5	30,9	24,5	0	111,0
GMELIA	13,2	16,0	3,5	25,9	2,9	0,7	62,2

Certains de ces acides sont connus pour leur pouvoir complexant élevé; c'est particulièrement le cas des acides citrique et oxalique. Ils sont susceptibles d'exercer une action importante sur la redistribution du Fer et de l'Aluminium en faisant passer ces métaux sous forme de complexes solubles. Leur effet sera évidemment dépendant de leur survie dans le sol, où ils sont plus ou moins rapidement dégradés.

Par ailleurs, 8 à 25 % du carbone hydrosoluble se trouve sous forme de sucres réducteurs, susceptibles d'exercer une action sur le potentiel d'oxydo-réduction du sol. La production annuelle de ces sucres serait de l'ordre de 20 kg/ha/an pour Guiera, et de 78 kg/ha/an pour Khaya. Là encore, l'influence de ces substances sera essentiellement dépendante de leur évolution dans le profil.

Bien que produites en faible quantité, ces substances complexantes et réductrices pourraient exercer une action sur les sols en raison de leur concentration momentanée dans une partie du profil (activité biologique forte en début de saison des pluies).

Sous jachères et cultures, le pédoclimat plus contrasté (forte fluctuation des températures et alternance d'engorgements et de fortes dessiccations dans les horizons superficiels, maintien de l'humidité en profondeur)

est moins favorable que celui de la forêt à l'activité biologique globale (indices inférieurs de 46 à 90 % selon CHARREAU et FAUCK, 1970).

Le système racinaire des plantes n'exploite le sol que sur une profondeur de l'ordre de quelques décimètres (maximum 1 mètre), aussi n'est-il pas en mesure d'exercer le même effet que celui de la forêt sur la concentration et la remontée en surface des éléments mobilisables. Ainsi s'explique le déplacement de l'équilibre des bases échangeables consécutif à la déforestation (voir chapitre 7).

La matière organique produite est, pour une large part, constituée par les racines qui se décomposent sur place ; leur quantité peut atteindre 7, 75 tonnes/hectare, à Séfa, dans une jachère, 2 tonnes dans une culture de maïs et seulement 1 tonne dans une culture d'arachide (selon CHARREAU et al., 1970). Le cycle est alors en majorité souterrain et le transport réduit au minimum. Les parties aériennes, plus abondantes (respectivement 15, 5, 5, 5 et 2 tonnes) sont souvent détruites par le feu ou entièrement consommées par les termites, exceptionnellement enfouies par le labour. Les composés organiques hydrosolubles produits dans ces conditions sont mal connus, mais probablement différents de ceux issus des litières forestières.

D - CONCLUSIONS.

Le climat de moyenne Casamance nous est apparu comme étant caractérisé :

- par un fort gradient pluviométrique Nord-Sud (100 mm pour 15 km, le plus élevé observé au Sénégal à grande échelle),
- par des variations interannuelles importantes : les pluviosités oscillent largement autour d'une valeur normale (1200 mm à Séfa), mais n'atteignent que rarement une valeur égale à l'E. T. P. annuelle (1679 mm à Séfa),
- par un contraste marqué entre deux saisons : l'une à bilan hydrique très excédentaire, regroupant toutes les pluies (pluviosité supérieure à l'E. T. P. saisonnière), l'autre à bilan entièrement déficitaire (pluie nulle, E. T. P. forte).

Entre ces deux saisons, un effet compensateur résulte de l'utilisation des réserves en eau accessibles aux plantes : dépendantes du volume de terre exploité par les racines, elles sont reconstituées annuellement en période humide et utilisées en début de saison sèche.

- Sous forêt, l'enracinement dépasse 6 mètres de profondeur, des réserves en eau élevées permettent le maintien de la végétation durant la plus grande partie de l'année ; dans ces conditions, le cycle biogéochimique assure le retour annuel à la surface d'une large part des éléments prélevés par les racines dans le très vaste volume qu'elles exploitent.

- Sous végétation herbacée, jachère et culture, la profondeur est bien moindre (de 200 à 15 cm) ; les réserves en eau disponible, peu importantes, sont épuisées quelques semaines après les dernières pluies, le cycle biogéochimique n'intéresse alors que les quelques décimètres superficiels.

Ainsi l'homme a-t-il le pouvoir, dans cette zone forestière caractérisée par une pluviosité très variable dans l'espace et oscillante dans le temps, mais presque toujours comprise entre les valeurs de l'évapotranspiration potentielle annuelle et celles de la pluviosité, de modifier, par son action sur la déforestation, les éléments des bilans hydriques et géochimiques, et de perturber ainsi l'échelle des cycles naturels dans le temps et dans l'espace.

Chapitre 3

LA DISTRIBUTION DES SOLS ROUGES ET DES SOLS BEIGES EN CASAMANCE ET DANS LES RÉGIONS AVOISINANTES

INTRODUCTION - LE CRITERE DE COULEUR ET SA SIGNIFICATION.

Etudiant ces sols qui doivent à un matériau originel commun, constitué principalement de kaolinite, de quartz et de sesquioxydes de fer, d'avoir bien des caractéristiques comparables (texture à dominance sablo-argileuse à argilo-sableuse, structure à tendance massive...), les pédologues ont d'abord retenu comme caractères distinctifs les couleurs. Celles-ci présentent en effet une gamme très remarquable de nuances, allant des rouges les plus vifs (10 R 4/8) aux bruns pâles (10 YR 7/4), en passant par toutes les nuances des rouges jaunes, des jaunes rouges, des roses et des bruns ; elles sont, de plus, directement visibles grâce aux termites qui construisent leurs nids et tapissent les troncs des arbres d'une terre remontée de la profondeur. Aucune autre caractéristique de ces sols n'est à la fois aussi évidente, ni aussi diversifiée.

Devant toutes ces nuances de teintes qui caractérisent les sols de Casamance, les pédologues utilisent communément deux appellations : "rouge" (bien défini sur le code de couleur MUNSELL : 10 R et 2, 5 YR) et "beige" (beaucoup plus imprécis puisqu'il s'agit, à la lettre de la couleur d'une laine naturelle). Ce découpage suppose qu'il existe, au niveau des sols, une certaine discontinuité dont il conviendra de préciser la nature.

Cette importance accordée à la couleur ressort en particulier des travaux de MAIGNIEN (1961), portant sur les régions sud-ouest du Sénégal, qui a mis en évidence des relations entre la couleur des sols et d'autres caractéristiques morphologiques (épaisseur plus importante du profil, porosité élevée et présence de "micro-agrégats" dans les sols rouges ; diffé-

renciation plus accentuée des horizons, porosité moindre et structure plus large dans les beiges). Il a été ainsi conduit à supposer que les processus pédogénétiques dominants étaient différents dans l'un et l'autre type de sol. De ce fait, ces sols se sont vu attribuer des places différentes dans la classification française, les "rouges" étant considérés comme "ferrallitiques", les beiges comme "ferrugineux tropicaux".

Une telle distinction s'est trouvée confortée par les observations de nombreux autres pédologues qui ont relevé, tant au Sénégal (COINTEPAS, 1960 - FAUCK, 1955) qu'en d'autres pays d'Afrique (RIQUIER, 1963 - CHATELIN, 1969) et de Madagascar (HERVIEU, 1966) qu'une relation constante semblait exister entre la couleur des sols tropicaux et leur position dans le paysage. Ils ont ainsi attribué cette relation à des différences de régime hydrique, les rouges étant situés en haut de pente et sur les crêtes, en position favorable au drainage, les beiges en bas de pente et sur les plateaux. A ces différences de régime hydrique seraient donc liées des orientations divergentes de la pédogenèse : dominance d'un drainage profond dans les sols "rouges", développement du colmatage par le jeu des phénomènes d'illuviation dans les "beiges".

Des travaux expérimentaux apportent un certain éclairage à ces observations. Citons par exemple MONNIER (1967) qui, étudiant une série d'échantillons artificiels, composés de proportions diverses de sables et limons blancs et d'une argile brun jaunâtre (10 YR 5/4), constate que leurs couleurs correspondent à la même nuance, mais diffèrent par leurs valeurs de la façon suivante : identique à celle de l'argile lorsque celle-ci constitue une phase continue (sa teneur est alors supérieure à 40 % et l'impression tactile ne décèle pas la présence des sables et limons), elles sont dépendantes de la taille des particules sableuses et limoneuses pour des teneurs en argile plus faibles. Dans ces conditions la couleur résulterait de la proportion de la surface de ces particules (simples ou complexes) effectivement recouverte par une pellicule suffisamment épaisse d'argile pour être colorée (de l'ordre de quelques microns d'épaisseur). Ce résultat met donc en évidence la relation qui existe entre la couleur des sols et l'organisation des matériaux pédologiques. En présence de plusieurs constituants différemment colorés, la couleur du sol est ainsi liée à la distribution relative de chacun d'eux.

En conclusion, les colorations très diverses des sols de Casamance, qui semblent s'ordonner en fonction des positions dans le paysage, liées à la nature des composés du fer (SEGALEN, 1969), expriment surtout l'état d'organisation des matériaux, dépendant des processus pédogénétiques qui assurent la redistribution des fractions constitutives dans le profil : celle d'entre elles qui forme la pellicule superficielle des éléments texturaux et structuraux donne au sol sa couleur lorsqu'elle couvre la majeure partie de la surface et s'associe à celle des autres constituants lorsqu'elle ne représente qu'une couverture très fine et discontinue.

A - DISTRIBUTION ZONALE ET REGIONALE DES SOLS ROUGES ET DES SOLS BEIGES.

L'étude de la distribution des sols rouges et des sols beiges dans les régions Sud-ouest du Sénégal peut être abordée à la lumière des documents cartographiques actuellement disponibles, réalisés durant les dix dernières années :

- à petite échelle : carte pédologique, à l'échelle de 1/1 000 000, du Sénégal, dressée par MAIGNIEN (1965)(Numéro 1).

- à moyenne échelle : cartes pédologiques à l'échelle de 1/200 000

  . de haute Casamance, dressée par FAUCK, TURENNE et VIZIER (1963) (Numéro 2).

  . de moyenne Casamance, dressée par TOBIAS, STAIMESSE et BALDENS PERGER (1968)

    : carte "morphopédologique" à l'échelle de 1/100 000 (numéro 3)

  . des régions soudaniennes du Sine Saloum, dressée par BERTRAND (1970) (Numéro 4).

- à grande échelle : carte pédologique à l'échelle de 1/20 000
  . de la région de Séfa, dressée par FAUCK, SEGUY et TOBIAS (1968) (Numéro 5).

  : carte de reconnaissance pédologique à l'échelle de 1/50 000 (numéro 5)

  . de quelques zones du département de Sédhiou, dressée par BERTRAND (1970) (Numéro 6).

Les documents numérotés 1, 3 et 4 ont été utilisés pour l'élaboration de la carte schématique de distribution des sols ci-jointe (fig. 3-1) sur laquelle figurent 10 unités cartographiques :

- deux d'entre elles correspondent à des sols dont les matériaux originels ne sont pas constitués directement par les formations gréso-argileuses du "Continental terminal". Ils sont, de ce fait, exclus de notre étude

  . unité 10- Sols (ferrugineux tropicaux lessivés) developpés sur les recouvrements sableux d'origine éolienne qui s'étendent au nord du Saloum,
  unité 21- Sols (halomorphes et hydromorphes, réunis ici afin de simplifier la carte) formés sur des vases marines, des alluvions et des colluvions sableuses et argileuses.

- deux autres représentent les sols "rouges" (ferrallitiques)
  . unité 2 - Sols rouges typiques profonds, identiques à ceux décrits dans le 2e chapitre.
  . unité 3 - Sols rouges, peu épais, recouvrant parfois des niveaux indurés ou contenant des blocs de cuirasse, mais ayant en commun avec ceux de l'unité 3 des caractères de couleur, de friabilité, de porosité.

- quatre unités figurent les sols "beiges" (ferrugineux tropicaux)
  . unité 4 - Sols beiges typiques, identiques à ceux décrits ultérieurement (cf. chapitre 5).

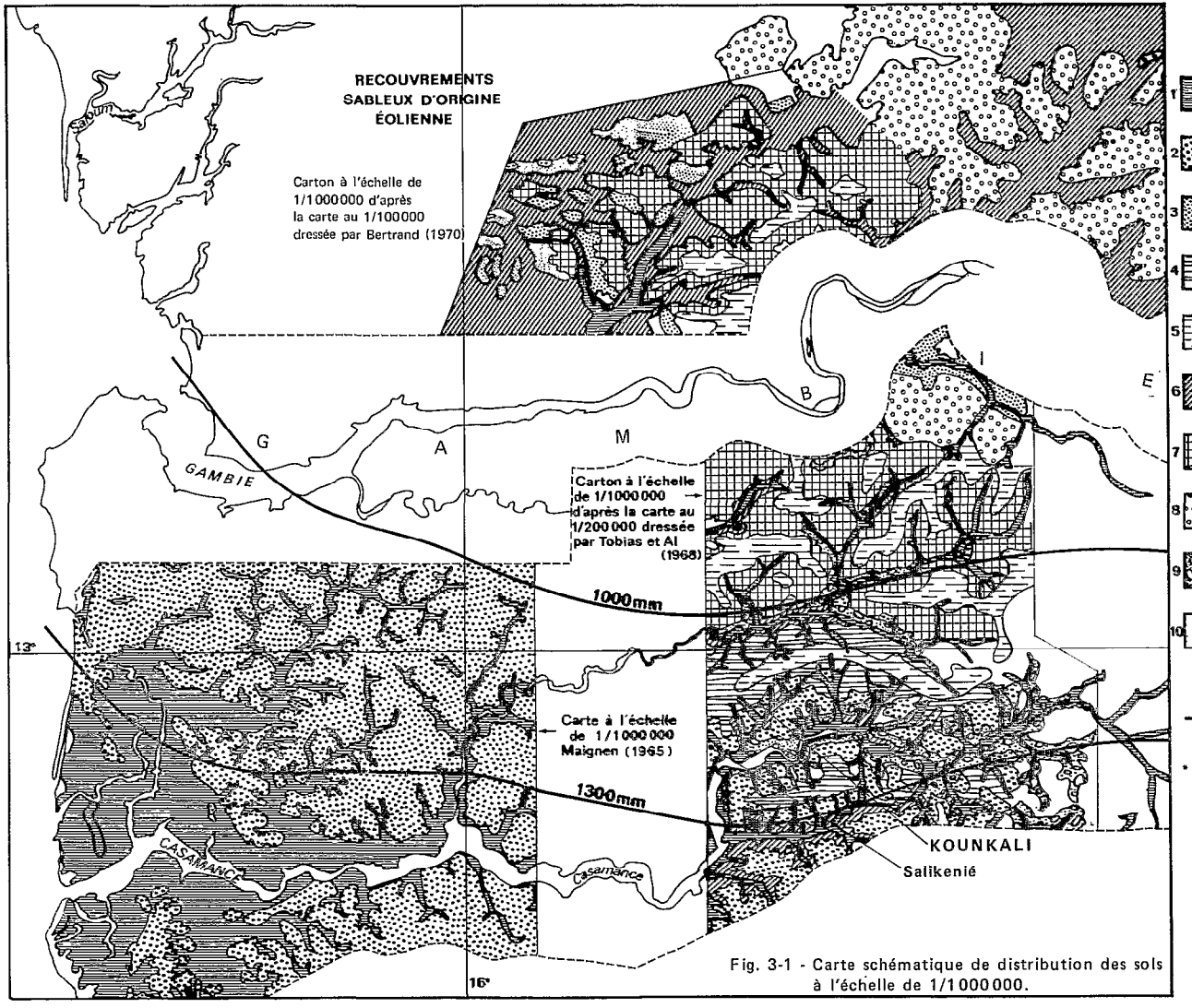


Fig. 3-1 - Carte schématique de distribution des sols à l'échelle de 1/1000000.

. unité 5 - Sols beiges hydromorphes, caractérisés par le développement des "taches et concrétions de pseudogley" dans les horizons profonds (cf. chapitre 5).

. unité 7 - Sols beiges "indurés en carapace ou cuirasse", présentant une forte teneur en éléments indurés plus ou moins anastomosés en profondeur, souvent tronqués par l'érosion.

. unité 6 - Sols beiges "de pente" sur matériaux remaniés du "Continental terminal", d'aspect divers selon leur environnement pédologique , mais présentant des analogies avec ceux de l'unité 5.

- deux unités désignent des sols peu évolués développés sur des matériaux riches en éléments indurés.

. unité 8 - Sols "gravillonnaires" (peu évolués d'érosion), proches des sols beiges par leur couleur mais peu épais ($<$ 50 cm) ; MAIGNIEN (1965) en fait d'anciens sols ferrugineux tropicaux à concrétions ou à cuirasse (unité 7), dont les horizons superficiels meubles auraient été décapés par érosion hydrique.

. unité 9 - Sols formés sur matériaux de démantèlement de cuirasse ("peu évolués d'apport"), caractérisés par des proportions variables de blocs indurés de dimensions très irrégulières.

- une unité enfin n'est pas représentée à l'échelle de 1/1000000: elle correspond aux sols lithiques , bruts d'érosion (affleurements de cuirasse) considérés par MAIGNIEN (1965) comme étant les termes ultimes de dégradation des sols ferrugineux tropicaux à concrétions ou à cuirasse (unité 7), dont les horizons superficiels ont été entièrement déblayés par l'érosion hydrique.

Cette simple énumération, éclairée par les conclusions des travaux de MAIGNIEN (1965) évoque des relations de filiation possibles entre les sols des unités 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 11 (beiges, peu évolués et bruts d'érosion)

mais n'implique pas de relation génétique entre sol rouge et beige.

La distribution des sols correspondant à ces 11 unités, telle qu'elle apparaît sur la carte, appelle quelques remarques :

1) Elle semble être tout d'abord en relation avec la zonation climatique actuelle (indiquée par les isohyètes normales trentenaires portées en surcharge) :

- les sols rouges typiques profonds (unité 3) sont, dans leur grande majorité situés dans une zone de pluviosité supérieure à 1000 mm (1),
- les sols beiges typiques, mais surtout hydromorphes, indurés en carapace ou cuirasse, les sols gravillonnaires et les affleurements de cuirasse deviennent dominants plus au nord sous des pluviosités inférieures.

2) Cependant, les exceptions à cette distribution zonale sont évidentes.

- les sols "beiges" (ferrugineux tropicaux lessivés), considérés comme typiques (MAIGNIEN, 1961) sont surtout représentés immédiatement en bordure, ou plus souvent encore associés aux sols rouges profonds dans le sud de la moyenne Casamance, sous des pluviosités comprises entre 1000 et 1410 mm. Ils deviennent même dominants plus à l'est, vers la haute Casamance, alors que la pluviosité reste sensiblement constante (gradient latitudinal),

---

(1) Cette affirmation s'accorde avec les observations faites par HILL (1969) sur la rive sud de la Gambie ; les sols rouges y occupent de vastes zones en bordure de l'océan, mais se raréfient progressivement vers l'est pour n'être plus représentés que par de petites surfaces dans la région située au sud-est du Bintang Bolon (caractérisée par une pluviosité normale de 1000 mm), où dominent des sols beiges qui présentent, selon l'auteur, des caractères de transition avec les sols rouges.

- des sols rouges peu épais (mais ayant des caractères communs avec les sols rouges typiques) se retrouvent au nord de la Gambie, dans la région de Sine Saloum dont la pluviosité est inférieure à 700 mm.

3) Ces exceptions, qui semblent être en relation avec l'évolution du modelé et plus particulièrement du réseau hydrographique, déterminent des distributions régionales :

α) Dans la zone de pluviosité supérieure à 1000 mm :

- En Casamance maritime, sur un modelé de bas plateaux morcelés, pénétrés par un réseau de chenaux soumis à l'action des marées, les sols rouges typiques profonds sont largement dominants (voire exclusifs selon MAIGNIEN, 1965 et VIEILLEFON, 1974).

- En moyenne Casamance (dans sa partie méridionale), les plateaux plus élevés (40 m) sont entaillés sur leur périphérie par un réseau de petites vallées, orientées principalement NW.SE et NE.SW, qui isolent des interfluves et rejoignent les principaux cours d'eau à un niveau à peine supérieur à celui de la mer. La partie la plus découpée porte des sols rouges, tandis que le centre des plateaux est occupé par des sols beiges typiques qui cèdent leur place, plus au nord à des "beiges hydromorphes". Les versants des petites vallées portent des sols beiges de pente, ceux de la vallée du fleuve des sols peu évolués sur matériau de démantèlement de cuirasse.

- En haute Casamance, à un réseau hydrographique plus lâche et moins profondément imprimé dans le modelé, correspond une distribution des sols différente : les sols rouges ne figurent plus qu'à l'état de témoins, tandis que les beiges occupent la plus grande partie des plateaux. A la limite orientale de la région (non figurée sur la carte), en bordure de la rivière Koulountou, des sols rouges de profondeur irrégulière occupent une partie de la vallée.

β) Dans la zone de pluviosité inférieure à 1000 mm :

- Dans la partie septentrionale de la moyenne Casamance, le réseau hydrographique, assez lâche découpe de vastes plateaux occupés, sur leur périphérie par des sols beiges indurés et en leur centre par des

sols beiges hydromorphes, laissant place, au nord-est à des sols "gravillonnaires" et à des affleurements de cuirasse. A proximité de la frontière, des sols rouges peu profonds sur cuirasse se retrouvent en bordure d'un affluent de la Gambie.

- Dans le Sine Saloum enfin, sous une pluviosité bien inférieure, les sols rouges peu profonds sont regroupés autour de la dépression du Bao Bolen, tandis que les vastes plateaux qui s'étendent vers l'est portent des sols beiges indurés tronqués, des sols beiges hydromorphes, des sols gravillonnaires et des affleurements de cuirasse.

En conclusion, examinée dans son ensemble, la distribution des sols beiges et rouges formés sur les matériaux gréso-argileux du "Continental terminal" semble obéir approximativement à une loi de zonalité latitudinale (en relation par exemple avec le gradient pluviométrique actuel) les sols rouges étant regroupés dans les zones les plus humides, les beiges dans des zones moins pluvieuses.

Cependant, à l'échelle des régions, la distribution des deux types de sols, associés dans la zone de pluviosité supérieure à 1000 mm, est surtout dépendante de l'évolution du modelé et plus particulièrement du développement du réseau hydrographique : les sols rouges sont dominants sur les systèmes de plateaux et d'interfluves découpés par un réseau hydrographique dense et fonctionnel ; ils font place aux sols beiges là où ce réseau devient rare et discontinu.

Or, nous savons (chapitre 2) que ce modelé s'est formé durant la période quaternaire par l'action conjuguée de phénomènes tectoniques, responsables de la formation de systèmes de failles, et de l'alternance des transgressions et régressions du niveau marin, coïncidant avec des phases climatiques alternativement sèches et humides, déterminant le creusement des vallées selon un tracé influencé par le réseau de fracture. Cette longue histoire de la formation du modelé qui se poursuit actuellement, serait donc en partie responsable de la distribution régionale des sols.

Cette relation entre la distribution des sols et le modelé pourrait être expliquée en se référant par exemple à 2 hypothèses :

- selon la première, la distribution des sols serait directement dépendante des variations dans l'espace observées dans les matériaux

du "Continental terminal" (cf. chapitre 2) liées à l'histoire géomorphologique : sols rouges et beiges seraient formés sur des matériaux originels différents. Cette hypothèse est peu compatible avec la distribution zonale mise en évidence,

- selon la seconde qui est plus plausible, cette distribution révèlerait, en fait, la diversité des conditions pédoclimatiques et physico-chimiques réalisées dans le temps et dans l'espace, responsable du maintien du sol rouge ou/et du développement du sol beige selon la position par rapport au modelé. Cette hypothèse, qui suggère des relations génétiques possibles entre les deux types de sols, conduit à envisager l'étude de la distribution des sols à l'échelle des paysages suivant lesquels ils s'ordonnent.

B - DISTRIBUTION PAYSAGIQUE DES SOLS ROUGES ET BEIGES.

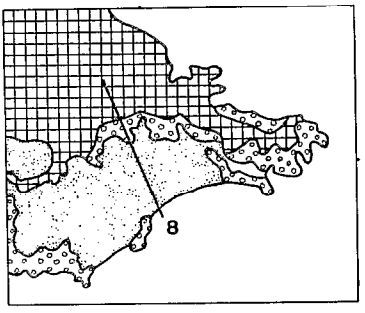
Elle sera étudiée :

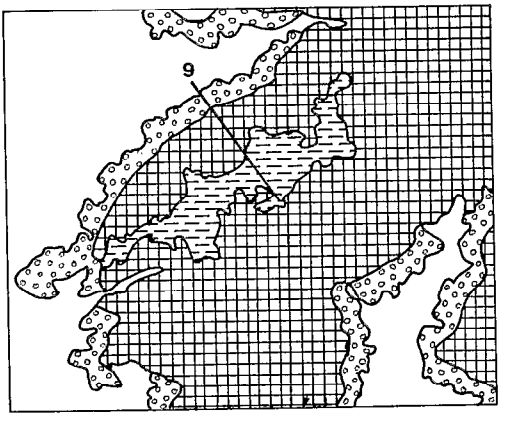
- tout d'abord suivant un axe sud-nord,
- puis plus particulièrement dans la région de Séfa et de Sedhiou où se trouve concentrée une grande partie de nos observations.

1/ - Variation sur un axe Sud-Nord, allant de la frontière de Guinée Bissau jusqu'à la région du Sine Saloum.

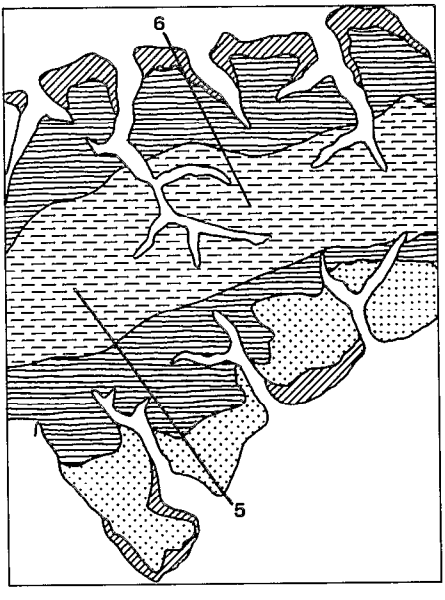
Ayant constaté que cette distribution se modifiait en fonction de la zonation climatique actuelle, de la largeur des interfluves et de l'importance des axes de drainage, nous avons été conduits à faire l'inventaire des types de distribution observés, chacun étant représenté à l'aide d'un exemple à la fois par un carton (extrait des cartes à l'échelle de 1/200 000 et de 1/100 000) et par la coupe correspondante (fig. 3-2 et 3-3) :

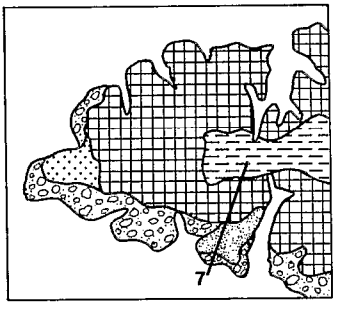
a) Au sud de la moyenne Casamance, à proximité de la frontière de la Guinée Bissau, sous une pluviosité comprise entre 1300 et 1400 mm, 4 types



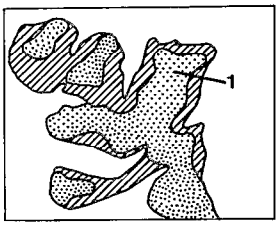


AU NORD DE LA GAMBIE, DANS LE SINE SALOUM





AU NORD DE LA BOUCLE FORMEE PAR LA CASAMANCE



AU SUD DE LA MOYENNE CASAMANCE

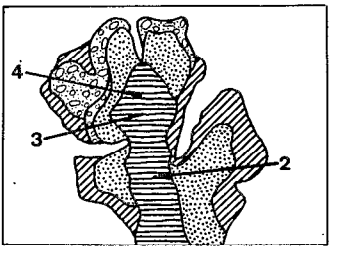


FIG.3.2. DISTRIBUTIONS DES SOLS DU SUD AU NORD

(LES FIGURES SONT CEUX DE LA LEGENDE DE LA FIG 3.1)

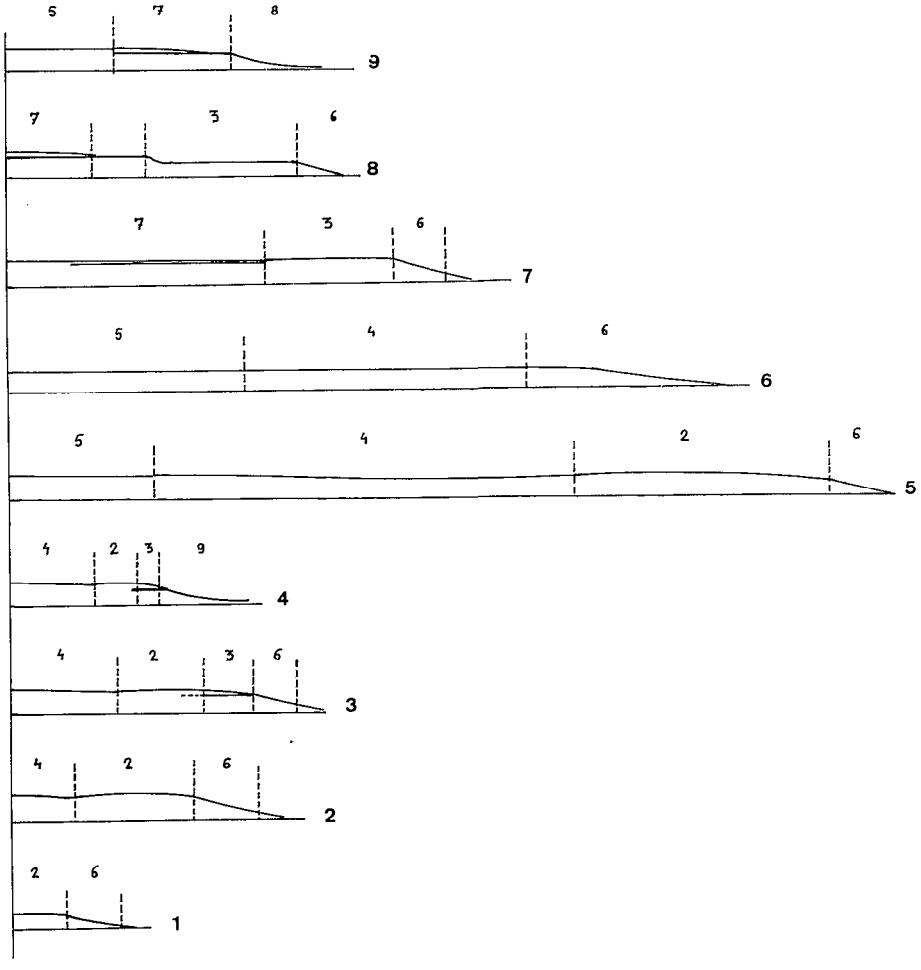


FIG. 3.3. COUPES CORRESPONDANTES AUX DISTRIBUTIONS DES SOLS DE LA FIG. 3.2.

(LES NUMÉROS PORTÉS EN REGARD DES COUPES SONT CEUX DE LA FIG.3.2)

(LES NUMÉROS INSCRITS AU-DESSUS DES SOLS FONT REFERENCE A LA FIG.3.1)

de successions de sols sont observés sur des plateaux de dimensions réduites (2 à 5 kilomètres) découpés par les vallées des affluents de la Casamance.

type n° 1 - cas extrême, relief étroit (2 kilomètres), émoussé : les sols rouges occupent la surface convexe, au centre ; les sols "beiges de pente" sont développés sur les versants.

type n° 2 - plateau étroit (5 kilomètres) : les sols "beiges de plateau" sont développés sur la partie plane médiane, les sols "rouges" sur les surfaces convexes située en bordure, les sols "beiges de pente" sur les versants.

type n° 3 - c'est une variante du cas n° 2 : le niveau cuirassé, profondément enterré dans les types précédents apparaît ici à 1 ou 2 mètres sous les sols rouges, en bordure de plateau.

type n° 4 - il s'agit de la deuxième variante : ce niveau cuirassé affleure en bordure de plateau et ce sont alors les sols jaunes formés sur les matériaux de son démantèlement qui occupent les versants.

b) Au Nord de la boucle formée par la Casamance, sous une pluviosité comprise entre 1000 et 1300 mm, sur des plateaux plus larges entaillés sur leur bordure par les petites vallées des affluents de la Casamance et du Sangrougrou, les sols s'ordonnent selon 3 types de succession :

type n° 5 - plateau de près de 10 kilomètres de large, dans sa partie méridionale entaillée par les affluents de la Casamance : la zone centrale dont l'horizontalité n'est qu'à peine interrompue par de petits thalwegs est occupée par des sols "beiges hydromorphes", les sols "beiges de plateau" les entourent, et les "rouges", limités au rebord, sont d'autant plus typiques qu'ils se trouvent sur une surface plus convexe, mais s'éclaircissent là où le relief s'amortit. Les interfluves de faible dimension, isolés du plateau par les vallées des affluents de la Casamance, présentent les types de distribution 1 - 2 - 3 et 4.

type n° 6 - sur la partie septentrionale du même plateau, limitée par la vallée du Sangrougrou, partiellement colmatée à ce niveau, le rebord n'est plus occupé par des sols "rouges typiques", ni même " "éclaircis" mais "beige rose" selon l'appellation de COINTEPAS (1960).

type n° 7 - relief tabulaire limité par de petites vallées : la partie centrale reste occupée par des sols beiges hydromorphes, tandis que les sols beiges situés à la périphérie présentent, à faible profondeur un niveau induré en carapace ; quelques témoins de sols rouges peu épais, en position de bordure.

c) Au nord de la Gambie dans le Sine Saloum (mais aussi en limite de la Casamance le long de la rivière Koulountou et près de la frontière de Gambie) s'observent les 2 derniers types de distribution.

type n° 8 - surface tabulaire occupée par des sols beiges de plateau indurés (carapace) et tronqués, par des sols gravillonnaires et par des affleurements de cuirasse qui en soulignent les pourtours ; des sols rouges peu épais, polyphasés, tronqués, remaniés et colluvionnés (BERTRAND, 1971) s'observent en contrebas.

type n° 9 - surface tabulaire plus large située plus à l'est, des sols beiges hydromorphes se retrouvent au centre, tandis que les zones périphériques sont occupées par des sols beiges encore plus tronqués et gravillonnaires et que le liseré de cuirasse affleurante se généralise. Seules quelques "reliques" de sols rouges peu profonds observés en bordure de plateau (à l'occasion de la prospection des "terres neuves" HANRION, MERCKY, CHAUVEL, 1971) rappellent les associations observées en Casamance.

Ces divers types de distribution ont été récapitulés dans le tableau 3-1.

Remarques : l'exposé des faits tel qu'il vient d'être présenté, conduit à faire ressortir un certain nombre de points:

Tableau 3-1.

INVENTAIRE DES TYPES DE DISTRIBUTION DE SOLS.

	Types	Pluviosités	Relief	Réseau hydrographique	Distribution des sols par rapport aux reliefs
SUD	1 2 3 4	de 1400 mm à 1300 mm	Interfluves étroits à relief convexe et petits plateaux	Fleuve (Casamance) à un niveau peu supérieur à celui de la mer et ses affluents (vallées en couloirs tortueux à fond plat)	- Sols "rouges" sur les surfaces convexes - Sols "beiges de plateau" sur les surfaces planes - Sols "beiges de pente" et sols peu évolués sur matériaux de démantèlement de cuirasse } sur les versants
	5 6 7	de 1300 mm à 1000 mm	Plateaux plus vastes et surfaces tabulaires	Affluents de la rive nord de la Casamance et du Sangrougrou (tendance au colmatage)	- Sols beiges hydromorphes au centre - Sols beiges de plateau à la périphérie - Sols "rouges éclaircis" et "beige rose" en bordure - Sols beiges de pente et sols peu évolués sur matériau de démantèlement de cuirasse } sur les versants
NORD	8 9	moins de 1000 mm	Vastes surfaces tabulaires	Dépression du Bao Bolon et réseau hydrographique lâche et discontinu	- Sols "beiges hydromorphes" au centre - Sols beiges indurés, tronqués, gravillonnaires et reliques de sols rouges à la périphérie - Liserés de cuirasse affleurante en bordure - Sols rouges peu épais, colluvionnés en contrebas

- L'étude faite à l'échelle du paysage met en évidence des intergrades ("sols rouges éclaircis" "beiges roses"...) que SEGUY (1969) regroupe sous le terme de "sols rouges de transition". Selon cet auteur, ces sols forment une ceinture autour des sols rouges typiques. Ils peuvent aussi prendre leur place dans les sites qui leur sont habituels, là où le relief s'amortit et où le réseau hydrographique devient moins dense.

- Il apparaît une certaine continuité de l'ordre observé dans la distribution paysagique des sols lorsqu'on se déplace du Sud au Nord. Partant d'un paysage où les reliefs, aux formes convexes sont uniformément occupés par les sols rouges, on voit apparaître (sur ces reliefs) des surfaces planes sur lesquelles se développent des sols beiges (les sols rouges formant alors couronne) ; puis, à mesure que l'étendue de ces surfaces et que leur planéité s'accroissent, les caractères d'hydromorphie se manifestent au centre, tandis que les sols rouges passent par des stades de transition ou même disparaissent là où le réseau hydrographique s'estompe ; plus loin, les sols beiges de plateau de la zone périphérique apparaissent indurés et les sols rouges sont relégués sur les rebords. Dans une dernière phase, enfin, les surfaces tabulaires ne portent plus que des sols beiges hydromorphes, indurés, tronqués, gravillonnaires, ainsi que quelques "reliques" de sols rouges, un liseré de cuirasse affleurante souligne le rebord et des sols rouges polyphasés, colluvionnés sont observés en contrebas. Ainsi, alors que les sols rouges occupent le centre des reliefs au sud, ils forment une auréole d'autant plus lâche, claire et discontinue qu'on se déplace vers le nord, laissant place successivement en leur centre aux "beiges de plateau", "beiges hydromorphes", "beiges indurés", "gravillonnaires" ; ils ne figurent plus qu'à l'état colluvionné sur le pourtour des buttes résiduelles du Sine Saloum (BERTRAND, 1971).

Cet ordre ne semble pas être en relation avec une quelconque variation verticale des matériaux originels du "Continental terminal" (niveaux indurés, stratification...). S'il en était ainsi, chaque unité de sol apparaîtrait dans le paysage à une cote constante. Or, dans la seule région de Séfa, les zones de sol rouge se trouvent, en position d'interfluve (dite "de crête") ou de bordure de plateau à des altitudes qui varient entre 40 et 18 mètres. C'est donc la place des sols dans l'ordre de distribution et non leur

cote qui présente un caractère constant.

2/ - Variation de la distribution des sols dans la région de Sedhiou et de Séfa (Sud de la moyenne Casamance).

Notre attention s'est portée plus particulièrement sur cette région qui constitue une zone de transition, tant en ce qui concerne le modelé que la distribution des sols :

- passage progressif de la dominance d'interfluves à profils convexes au sud, à de vastes plateaux qui se généralisent au nord,
- modification de l'importance relative et de la localisation des sols rouges et beiges.

Cet aspect apparaît sur la carte (fig.1-2) établie à partir des travaux de TOBIAS (1968) - carte à l'échelle de 1/200 000 de la moyenne Casamance), complétés par les études faites à plus grande échelle par FAUCK, SEGUY, TOBIAS (1968) et par BERTRAND (1970) ainsi que par des observations faites au cours de notre étude.

Sur cette carte, on observe :

- au nord, un assez vaste plateau (14 kilomètres de large), compris entre la vallée de la Casamance et celle de son affluent principal le Sangrougrou. Il présente sur sa périphérie une suite de reliefs à profil convexe (zone désignée par le numéro 2 sur la carte), à peine accentués (leur hauteur ne dépasse pas quelques mètres), décelables seulement par un levé topographique (les cartes au 1/200 000 ne permettent d'en discerner la présence que très localement). Ces reliefs qui forment un bourrelet en auréole autour du plateau, portent des sols rouges typiques. Ils sont tronçonnés par les vallées latérales des affluents de la Casamance et du Sangrougrou qui, dans leur partie amont, reçoivent les eaux de surface collectées par les petits thalwegs du plateau. Ils forment ainsi une barrière discontinue entre le domaine des plateaux (numéro 1) caractérisé par quelques sols rouges de transition, mais surtout par des sols beiges et beiges hydromorphes et celui des interfluves (numéro 3) isolés les uns des autres par les vallées latérales, dont les surfaces convexes sont couvertes de sols rouges typiques et les versants de sols beiges de pente. Ils semblent bien constituer aussi une forme de relief de transition entre ces deux domaines : dissociés du

plateau par une entaille plus profonde des vallées, ils donnent naissance à des interfluves (il n'existe ainsi aucune discontinuité entre les zones 2 et 3, donc entre les rebords de plateau et les interfluves, entre les sols "rouges de crête" et les sols "rouges de plateau").

- Plus au Sud (au tiers inférieur de la carte), un autre ensemble de relief, de dimension globale comparable, présente une répartition différente entre les formes 1, 2 et 3. La partie centrale correspondant au domaine des plateaux (numéro 1) est exiguë (largeur de l'ordre de 4 kilomètres), occupée seulement par des sols beiges typiques de plateau. Le bourrelet périphérique est étroit et très discontinu. Le domaine des interfluves, découpé par les vallées, devient largement prépondérant.

- A la limite Sud enfin, le domaine des plateaux (numéro 1) n'est plus représenté, l'ensemble du relief étant constitué par des interfluves dont la surface plus ou moins convexe est occupée par des sols rouges et les versants par des sols beiges de pente.

Si la continuité entre les différentes formes de relief et l'existence d'une relation étroite entre ces dernières et la répartition des sols rouges et beiges semble être maintenant établie, il n'en va pas de même, en ce qui concerne la raison d'être de cette relation qui se situe entièrement dans le domaine des hypothèses. Il ne nous est pas possible, en effet de faire la part des influences exercées par les conditions de drainage par l'âge et la durée d'évolution des sols (MAIGNIEN, 1961).

C - DISTRIBUTION DES SOLS EN FONCTION DE L'OCCUPATION HUMAINE.

Des exemples de variations brusques dans la nature des sols, indépendantes de l'environnement paysagique et pédologique sont fréquemment observés en Casamance ; ces modifications, caractérisées par des limites plus ou moins nettes et discernables sur les photographies aériennes marquées parfois par des différences de végétation ou par le pourtour des parcelles actuellement cultivées, manifestent l'effet de l'action de l'homme

sur la transformation des sols.

Deux cas doivent être distingués qui diffèrent, tant par l'ancienneté de l'implantation humaine, que par les moyens mis en œuvre et par les sites topographiques choisis :

1/ - Implantation humaine moderne et culture mécanisée : Station expérimentale de Séfa, C. G. O. T., S. O. D. A. I. C. A.

Il s'agit d'une installation relativement récente dont l'historique est assez bien connu, les défrichements ayant commencé en 1949. On dispose des observations pédologiques et de mesures effectuées par FAUCK (1955), CHARREAU (1962) et COINTEPAS (1960) qui permettent d'apprécier les transformations subies par le sol. Les moyens mécaniques mis en œuvre ont été très puissants, responsables du bouleversement d'une partie des profils et de la destruction de la couverture végétale forestière sur de vastes étendues. L'utilisation des engrais a pu intervenir sur les conditions physico-chimiques d'évolution du sol. Enfin, le tracé des parcelles a été réalisé, ou rectifié, en tenant compte des données topographiques de façon à éviter la mise en culture des terrains trop accidentés, vulnérables à l'érosion ; il s'agit donc essentiellement de surfaces de plateau et de crêtes à peine marquées, l'entourage immédiat des axes de drainage étant exclu.

Dans ces conditions, SEGUY (1969) constate qu'en 17 ans d'exploitation continue, les sols rouges ferrallitiques typiques décrits par FAUCK ont évolué de telle sorte qu'ils doivent être maintenant rattachés aux "sols rouges de transition", présentant des caractères morphologiques communs avec ceux des sols beiges, notamment en ce qui concerne la différenciation de la couleur des horizons. La comparaison de ces profils avec ceux des sols regroupés sous la même appellation mais ayant évolué sans couvert végétal conservé sera faite dans le chapitre 5. Retenons dès à présent la réalité de cette évolution très rapide et locale, due à une transformation brutale des conditions de milieu.

2/ - Implantation humaine traditionnelle et culture manuelle.

Les études de géographie humaine (PELISSIER, 1967) révèlent l'existence, en moyenne Casamance, de nombreux sites de villages très

anciens, parfois abandonnés. Autour d'eux, des "couronnes de sols appauvris et allégés" correspondent à des surfaces défrichées par les cultivateurs depuis parfois plusieurs siècles. Ces couronnes sont limitées par une marge de taillis qui forment transition progressive avec la forêt.

SIBAND (1974) a entrepris l'étude de l'évolution des potentialités culturales des sols rouges en fonction de l'ancienneté de leur mise en culture suivant la méthode traditionnelle. Pour cela, il a effectué une enquête afin de reconstituer le passé cultural des sols de la région de Sedhiou, puis il a sélectionné des sites, dont certains sous forêt intacte, d'autres sous défriche récente, d'autres enfin sous culture plus ou moins ancienne (12 ans, 46 ans, 90 ans).

C'est en relation avec lui que nous avons été amenés à compléter l'étude de potentialité par une recherche des mécanismes pédogénétiques responsables de la transformation de ces sols.

A la différence du cas précédent, les moyens mécaniques mis en œuvre sont ici très réduits, le sol étant débarassé de sa couverture végétale à l'aide du feu, puis cultivé à la main. C'est donc principalement le mode d'action des facteurs naturels qui est ainsi modifié : exposition du sol à l'énergie cinétique des pluies, développement du ruissellement, modification des régimes hydriques et thermiques (cf. chapitre 2).

Ces sites de culture ne sont pas limités aux zones planes ; bien au contraire, ils tendent à se regrouper autour des axes de drainage, là où l'approvisionnement en eau est plus facile ; on les trouve donc principalement sur les interfluves et les rebords de plateau, en situation topographique variée. Ainsi s'explique probablement la diversité des évolutions observées : parmi les sites de cultures les plus anciens (datant de plus d'un siècle selon la tradition orale), certains sont caractérisés par la présence de sols rouges, profonds et relativement homogènes, mais beaucoup plus "légers" que ceux maintenus sous forêt, ils sont situés sur des reliefs accidentés, à proximité des axes de drainage ; d'autres sont caractérisés par une nette différenciation de la couleur et de la texture et de la structure des horizons (par comparaison aux sols avoisinants observés sous forêt), ils sont toujours en position moins favorable vis-à-vis du drainage externe (sur les plateaux).

En conclusion, les observations effectuées sur la répartition des sols en fonction de l'histoire de leur mise en culture prouvent que l'intervention humaine, en modifiant le couvert végétal, et par la même le pédoclimat, a entraîné une transformation profonde de leur évolution, selon des modalités qui restent en partie dépendantes de la situation de ces sols dans le paysage.

Il semble donc exister une possibilité de transformation des sols rouges sous l'effet des modifications provoquées des conditions de milieu, mais il est vraisemblable que des variations de même nature, à l'échelle des paysages, peuvent exercer des effets comparables . Aussi est-on conduit à étudier plus en détail un certain nombre de séquences de sol, choisies en fonction de l'ensemble des observations rapportées dans les paragraphes précédents.

D - CONCLUSION : CHOIX DES TOPOSEQUENCES ET SEQUENCES DE SOLS ETUDIEES.

Au terme de ce chapitre, nous avons constaté qu'à une distribution (zonale et) régionale des sols (sols "rouges" au Sud et sols "beiges" au Nord) se surimposait une distribution paysagique ordonnée en fonction des formes du relief : sols "rouges" sur les interfluves (zone 3) et sur les surfaces convexes situées sur le pourtour des plateaux (zone 2), sols "rouge de transition" et "beiges de plateau" sur leur partie médiane (zone 1), "sols beiges de pente" sur les versants (zone 2 et 3).

a) Localisation en fonction des paysages naturels.

Il est apparu que la première de ces distributions (visible sur la carte à l'échelle de 1/1 000 000) semblait résulter d'une variation progressive de l'importance relative des domaines correspondant à ces différentes formes de relief et à leur couverture pédologique, dans le paysage : domaine des interfluves seul représenté au Sud, entourant des plateaux exigus et leur bourrelet périphérique plus au nord, constituant seulement un liseré autour des plateaux plus vastes dans la partie septentrionale de la carte à l'échelle de 1/200 000.(cf. fig. 1-2).

La raison de cette variation reste hypothétique : une origine exclusivement zonale supposerait que l'évolution du relief (interfluve ou plateau) soit entièrement déterminée par la pédogenèse ("rouge" ou "beige") ; une action conjuguée des accidents tectoniques est vraisemblable, (compte tenu des indications données dans le chapitre 1) ; d'autres influences de nature géomorphologique sont possibles... Quoi qu'il en soit, cette distribution observée permet de déterminer les endroits où la probabilité d'existence d'une transformation locale, actuelle, des sols est la plus grande : il s'agit du secteur où se trouvent associés les sols "rouges typiques" et les sols "beiges de plateau", ainsi que leurs formes de transition et les sols beiges de pente ; c'est donc une transversale à l'auréole de reliefs discontinus à profil convexe (zone 2) qu'il faut réaliser. Or les sols observés suivant la transversale, lorsqu'ils sont distribués de façon ordonnée dans le paysage constituent des toposéquences. Il convient de les étudier selon un axe de plus grande pente, en allant d'une ligne de partage des eaux jusqu'à l'axe de drainage. Dans le cas présent, deux particularités modifient cette approche normale : la ligne de partage des eaux n'est pas précisément définie sur le plateau ; de plus, elle sépare deux domaines hydrographiques dépendants l'un des thalwegs (côté plateau), l'autre des cours d'eau (côté vallée). Pour couvrir toutes les situations, la toposéquence doit donc aller des premiers jusqu'aux seconds en traversant le relief périphérique. Sa dimension ne doit cependant pas être excessive. Sur l'ensemble des points d'observation étudiés, nous avons retenu seulement deux toposéquences, celles de Salikénié et de Kounkali qui présentent toutes les caractéristiques recherchées ; elles correspondent au type 5 de l'inventaire de distribution des sols.

b) Localisation en fonction de l'occupation humaine.

L'autre lieu où la probabilité d'existence de transformations locales et actuelles des sols est la plus grande est dépendant de l'implantation humaine.

Ayant constaté que la mise en culture entraînait une modification appréciable des profils de sols rouges typiques (mais beaucoup moins évidente dans le cas des sols beiges), les observations ont été limitées à ces sols.

L'objectif étant d'étudier l'effet de ces transformations, non plus dans l'espace mais dans le temps, il est nécessaire de choisir des séquences de sols, présentant des caractéristiques telles que l'on soit en droit de supposer qu'ils étaient identiques au départ et dont on connaisse le passé cultural, et plus précisément l'ancienneté de mise en culture, échelonnée sur le plus grand espace de temps possible.

Ces considérations ont guidé SIBAND (1971) dans le choix des profils étudiés. Dans une région caractérisée par une implantation humaine ancienne (celle de Sedhiou) et par la présence de sols rouges typiques, une étude préliminaire l'a renseigné sur l'historique de la mise en culture des parcelles et sur les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols (portant particulièrement sur la granulométrie). C'est en fonction des données ainsi réunies qu'il a pu choisir 5 ensembles de profils comparables, dont l'ancienneté de mise en culture s'échelonnait de 0 à 90 ans.

Les observations et analyses faites sur cette séquence ont été complétées par celles de nombreux profils de sols cultivés situés dans des sites de villages anciens et sur les parcelles de la station expérimentale de Séfa.

Deuxième Partie

ÉTUDE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS

Introduction

Nous avons reconnu l'existence de distributions ordonnées des sols dans le paysage, portant en particulier sur les sols "rouges" et "beiges de plateau". Cette situation nous conduit à envisager la possibilité de filiations pédogénétiques. Afin de déterminer la réalité des relations entre ces sols, nous nous proposons d'étudier maintenant les modalités du passage de l'un à l'autre et de saisir la signification des limites qui les séparent au sein des toposéquences.

De plus, nous avons observé des modifications importantes de ces sols, liées à l'action de l'homme, et plus précisément à l'effet de la déforestation. La comparaison d'une série de profils plus ou moins anciennement cultivés, regroupés en une séquence, nous renseignera donc sur l'évolution des sols, en fonction du temps écoulé depuis la suppression de la couverture végétale arborée.

Cette étude portera donc, en premier lieu sur les sols rouges et beiges organisés en toposéquences pédologiques, sous végétation forestière. Des indications complémentaires nous seront fournies par les données rela-

tives aux sols cultivés, dont les conditions d'évolution ont été modifiées, de façon contrôlée, par l'intervention de l'homme.

Quatre approches seront successivement utilisées dans cette seconde partie :

- la première de type morphologique a pour objectif de reconnaître l'échelle des différenciations entre profils dans le cadre des toposéquences et de la séquence d'évolution des sols cultivés (chapitre 4), puis de préciser les limites entre les horizons et de définir les organisations qui leur correspondent, ainsi que leurs variations verticales et latérales (chapitre 5) ;
- la seconde strictement analytique, destinée à fournir les données relatives à la granulométrie (chapitre 6) et à la composition chimique (chapitre 7) des matériaux pédologiques ainsi identifiés ;
- la troisième portant sur les caractéristiques des systèmes poreux et sur le fonctionnement hydrique des sols ;
- la dernière enfin relative aux transformations de l'organisation microscopique qui résultent des processus pédogénétiques.

Chapitre 4

TOPOSÉQUENCES, ASSOCIANT SOLS ROUGES ET SOLS BEIGES SOUS FORÊT, ET SÉQUENCES D'ÉVOLUTION DES SOLS ROUGES CULTIVÉS

Les successions de sols, ordonnées dans l'espace (toposéquences) ou dans le temps, suivant l'ancienneté du défrichement (séquence de sols cultivés) ont été choisies en fonction des objectifs poursuivis, précédemment exposés.

1/ - Les toposéquences.

Les deux toposéquences qui ont été retenues pour cette étude sont transversales à l'auréole de reliefs discontinus à profils convexes qui marque le pourtour des plateaux de moyenne Casamance ; elles s'étendent depuis les vallées qui entourent ces plateaux jusqu'à la surface sensiblement plane située en leur centre, à peine entaillée par de petits thalwegs suivant un tracé indiqué sur la carte de la fig. 1-2.

- L'une d'entre elle retiendra particulièrement notre attention : il s'agit de celle de Salikenié. La densité des observations et des mesures faites dans cette région, proche de la station expérimentale de Séfa est en effet particulièrement importante en raison de la contribution apportée par tous les pédologues qui s'y sont succédés : FAUCK (1955-1972), COINTEPAS (1960), TOBIAS (1965), SEGUY (1969), et de la collaboration qui a pu être établie, permettant le creusement de tranchées très profondes et la mise en place d'appareils de mesure. L'infrastructure et l'expérience acquises en 20 ans de recherches pédologique et agronomique dans cette région constituent un

appui considérable qui a été ici largement utilisé.

- La seconde toposéquence, située à près de 15 kilomètres au nord-est, à proximité du village abandonné de Kounkali, présente de nombreuses analogies, mais aussi quelques différences avec la première. Toutes les observations et mesure qui y ont été faites permettent, soit de vérifier la généralité, soit de compléter des données obtenues à Salikenié.

D'autres toposéquences ont été étudiées dans la région de moyenne Casamance, particulièrement à Bantankoutou, Talinkoulou et Dianiète. Le choix de ces sites d'observation a été fait grâce à l'aide de TOBIAS qui nous a fait bénéficier, à l'occasion de quelques tournées, de sa connaissance approfondie de la région. Les données morphologiques ainsi rassemblées permettent une extrapolation des résultats obtenus à Salikenié et à Kounkali.

a) Le tracé des toposéquences et la végétation.

Le tracé de la toposéquence de Salikenié a été établi de façon telle que la plupart des profils soient situés sous une végétation forestière conservée. Pour cette raison, il se présente sous la forme d'une ligne brisée dont l'angle obtus est situé au niveau du profil 14, au point le plus haut de la toposéquence. A partir de là, deux axes de plus grande pente rejoignent, au nord le marigot de Salikenié, et au sud-ouest la partie plane du plateau, entaillée par de petits thalweg qui gagnent la tête d'une vallée latérale.

Le tracé de la toposéquence de Kounkali est presque rectiligne mais il recoupe les zones anciennement cultivées d'un village abandonné dans lesquelles les sols ont été fortement modifiés par l'intervention de l'homme.

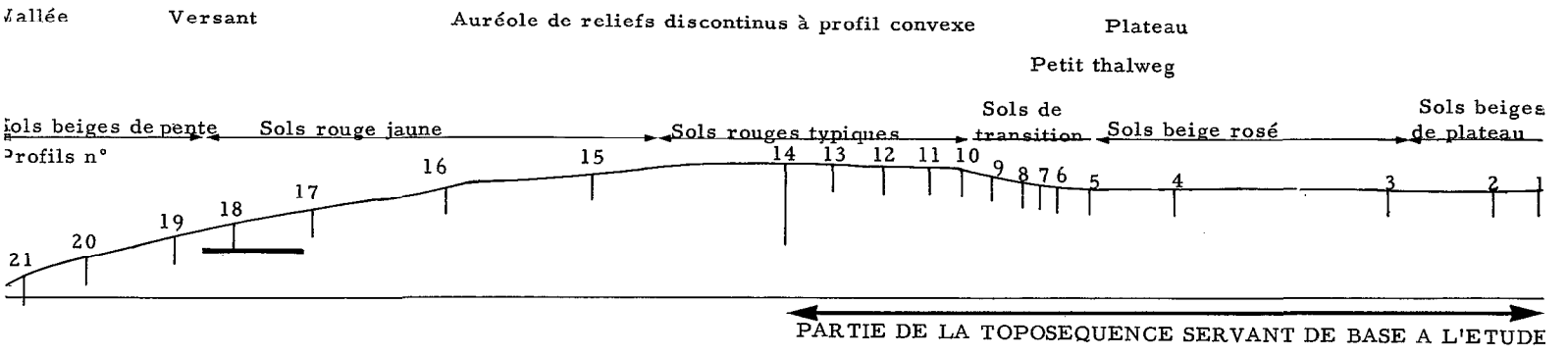
b) Le modelé.

Peu discernable à l'œil en raison de la faiblesse des pentes et de la végétation, il a été reconnu par lever topographique à la lunette. Il est typique de cette région de Casamance (cf. chapitre 1, § B).

Les coupes correspondantes sont représentées sur la figure 4-1 sur laquelle on distingue :

- un relief à profil convexe à peine marqué (au centre) dont l'altitude maximale est proche de 40 mètres, constituant

TOPOSEQUENCE DE SALIKENIE



TOPOSEQUENCE DE KOUNKALI

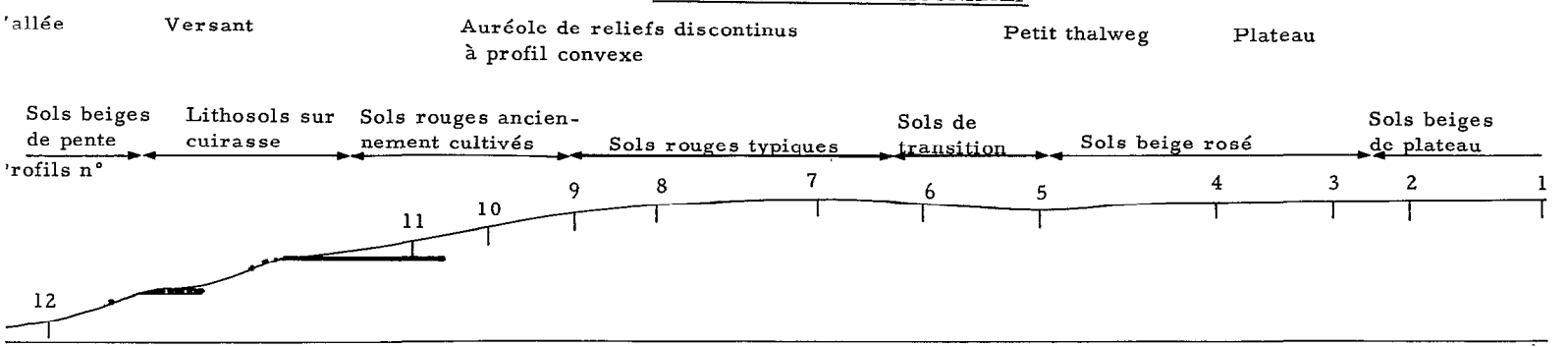
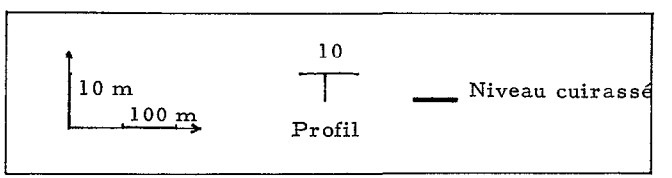


Fig. 4-1 - Coupe des toposéquences de Salikenié et de Kounkali
Répartition des sols et localisation des profils.



l'auréole discontinue qui entoure les plateaux et passe de façon insensible aux interfluves compris entre les vallées latérales ;

- un versant qui les relie aux vallées (à gauche) : de forme convexe dans la toposéquence de Salikenié, là où n'affleure pas le niveau induré, il présente deux décrochements en marches d'escaliers correspondants à des affleurements de cuirasse à Kounkali.

- un raccordement au plateau (profils 10 à 5 à Salikenié et 5 à Kounkali), marqué par une pente, d'abord sensible (2 à 3 % à Salikenié), qui s'amortit progressivement jusqu'au niveau d'un petit thalweg marquant sa limite inférieure (au niveau des profils 5). La dénivelée entre le sommet du relief convexe et ce thalweg est seulement de l'ordre de quelques mètres (4, 5 m à Salikenié, 2 m à Kounkali).

- une surface presque plane (à droite), à peine entaillée par de petits thalwegs, dont l'altitude moyenne tend à s'élever très légèrement vers le centre du plateau (où sont relevées les cotes les plus élevées sur la carte topographique).

c) La distribution des sols.

Elle est également caractéristique de la région.

- Seul le relief à profil convexe est occupé par des sols rouges typiques, c'est-à-dire par des sols de couleur uniformément rouge (2, 5 YR et 10 R), ne présentant pas de caractères de différenciation immédiatement décelables, sauf au niveau de l'horizon humifère. Ces sols sont cependant nettement plus sableux et de couleur plus claire au niveau des profils 9, 10 et 11 de la toposéquence de Kounkali, anciennement cultivés. Ils tendent, dans tous les cas, à se nuancer de teintes jaunes, en direction du versant, là où diminue la convexité du relief.

- Sur les versants sont observés de nombreux indices de remaniements : blocs de cuirasse, couvertures gravillonnaires, dépôts sableux... De plus, la nature des matériaux originels, en bordure des vallées semble être diverse (sables gris délavés, matériaux rapportés...) et dépendante de l'histoire géomorphologique (SEGUY, 1969). De nombreux profils y présentent cependant des caractères de différenciation convergente qui ont incité à les rassembler sous la dénomination de "sol beige de pente" (ferrugineux tropicaux jeunes, non lessivés, sur matériaux remaniés, BALDENSPERGER, STAIMESSE, TOBIAS, 1968). Il nous est apparu toutefois que cette partie très hétérogène des toposéquences (différente à Salikenié et à Kounkali) n'était pas représentative des phénomènes pédologiques majeurs propres à la moyenne Casamance et ne pouvait être retenue comme base pour cette étude.

- Sur le raccordement à la surface plane, est observé, sur une brève distance (200 m) un ensemble de variations ordonnées qui portent en particulier sur les couleurs des sols indiquées dans la figure 4-2 : partant du sol rouge typique, on observe le développement de teintes brunes à jaunes (2,5 à 5YR) qui, de haut en bas, gagnent progressivement les horizons AB, B 1 et B 2.

- Sur la surface plane, à partir des profils 6 et 5 (Salikenié) qui constituent en quelque sorte une transition, des couleurs plus pâles, à dominante brune (7,5 et 10 YR) se généralisent à l'ensemble des horizons et caractérisent les sols beiges qui recouvrent la partie centrale du plateau. Une évolution plus hydromorphe se manifeste alors localement par des colorations encore plus claires et par la présence de taches.

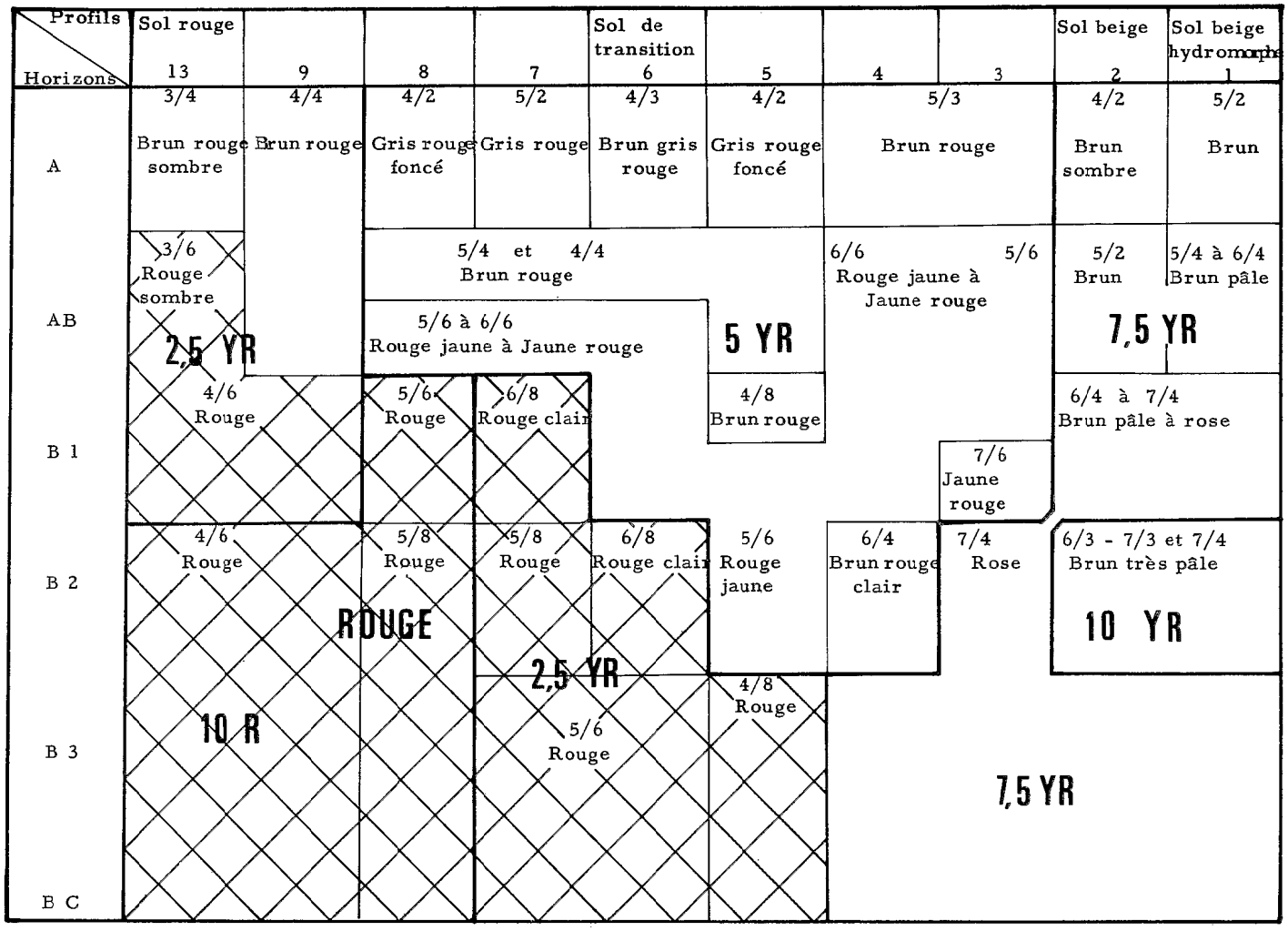


Fig. 4-2 - Notations de couleur (code Munsell) en allant du sol rouge et le sol beige hydromorphe de plateau, dans la toposéquence de Salikenié.

Ces variations ordonnées, relevées de façon détaillée dans la toposéquence de Salikenié au niveau du raccordement du relief convexe à la surface plane, sont également caractéristiques des emplacements semblables observés à Kounkali et dans les autres coupes de moyenne Casamance. Elles présentent donc un caractère de généralité.

Pour cette raison, nous avons choisi cette partie de la toposéquence (indiquée par une flèche horizontale sur la fig. 4-1), qui n'est marquée par aucun phénomène visible de remaniement, pour servir de base à notre étude.

2/ - La séquence de sols rouges cultivés.

Il s'agit ici de la série des profils choisis par SIBAND (1971) en fonction de l'enquête réalisée sur les caractéristiques intrinsèques des sols et sur leur passé cultural.

Ces profils sont situés dans la région de Sedhiou, à quelques dizaines de kilomètres des deux toposéquences choisies, dans des positions comparables à celles des sols rouges étudiés sous forêt. Leurs principales différences avec ces derniers sont donc dues à l'intervention de l'homme, qui, par le défrichement, a modifié leurs conditions d'évolution. Elles ne sont mises en évidence que par l'étude comparative de la morphologie des sols qui fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES SOLS

Les appréciations faites sur le terrain, en moyenne Casamance, portent principalement sur la couleur, la texture, la structure et l'aspect des formes d'individualisation des oxydes et hydroxydes de fer.

L'étude qualitative des variations verticales et latérales de ces 4 caractéristiques permet de distinguer les principaux horizons pédologiques, de déterminer leur disposition relative, de relever les transitions qui les séparent et de reconnaître ainsi les unités les plus directement visibles de l'organisation morphologique des sols.

L'étude portera successivement sur :

A - Les principaux types de sols de la toposéquence sous forêt et leurs variations latérales
- les sols rouges
- les sols de transition
- les sols beiges

B - Leur comparaison avec des sols cultivés depuis plus ou moins longtemps (de 0 à 90 ans).

A - PRINCIPAUX TYPES DE SOLS DE LA TOPOSEQUENCE SOUS FORET ET LEURS VARIATIONS LATERALES.

L'observation de 14 profils répartis entre le sommet de la surface convexe et le centre du plateau, dans la toposéquence de Salikenié, permet de reconnaître 3 types de différenciation pédologique, dont 2 correspondent aux sols étudiés par MAIGNIEN (1961) :

sols rouges ferrallitiques
sols beiges ferrugineux tropicaux.

Tableau 5-1.

REPARTITION DES PROFILS DE LA TOPOSEQUENCE DE SALIKENIE.

TYPES DE SOLS	ROUGE	DE TRANSITION	BEIGE
PROFILS	14 - 13 - 12 - 11 - 10	9 - 8 - 7 - 6 - 5	4 - 3 - 2 - 1
EXTENSION	550 mètres	200 mètres	800 mètres

Les profils 13, 6 et 2, considérés comme les plus représentatifs de chaque type de sol seront décrits en détail. Les autres permettront de suivre les variations latérales tout au long de cette partie de la toposéquence.

On remarque que les sols rouges et beiges, situés aux deux extrémités ont une extension plus importante que les sols de transition, limités à une frange de 200 mètres de large.

Toutes les observations relatives à ces 14 profils ont été faites au cours de la saison sèche (janvier 1970).

1/ - Les sols rouges.

a) Description du profil 13.

Végétation = forêt claire.

- strate arborée bien développée : Terminalia macroptera, Pterocarpus erinaceus, Cordyla africana,
- tapis herbacé discontinu d'andropogonées.

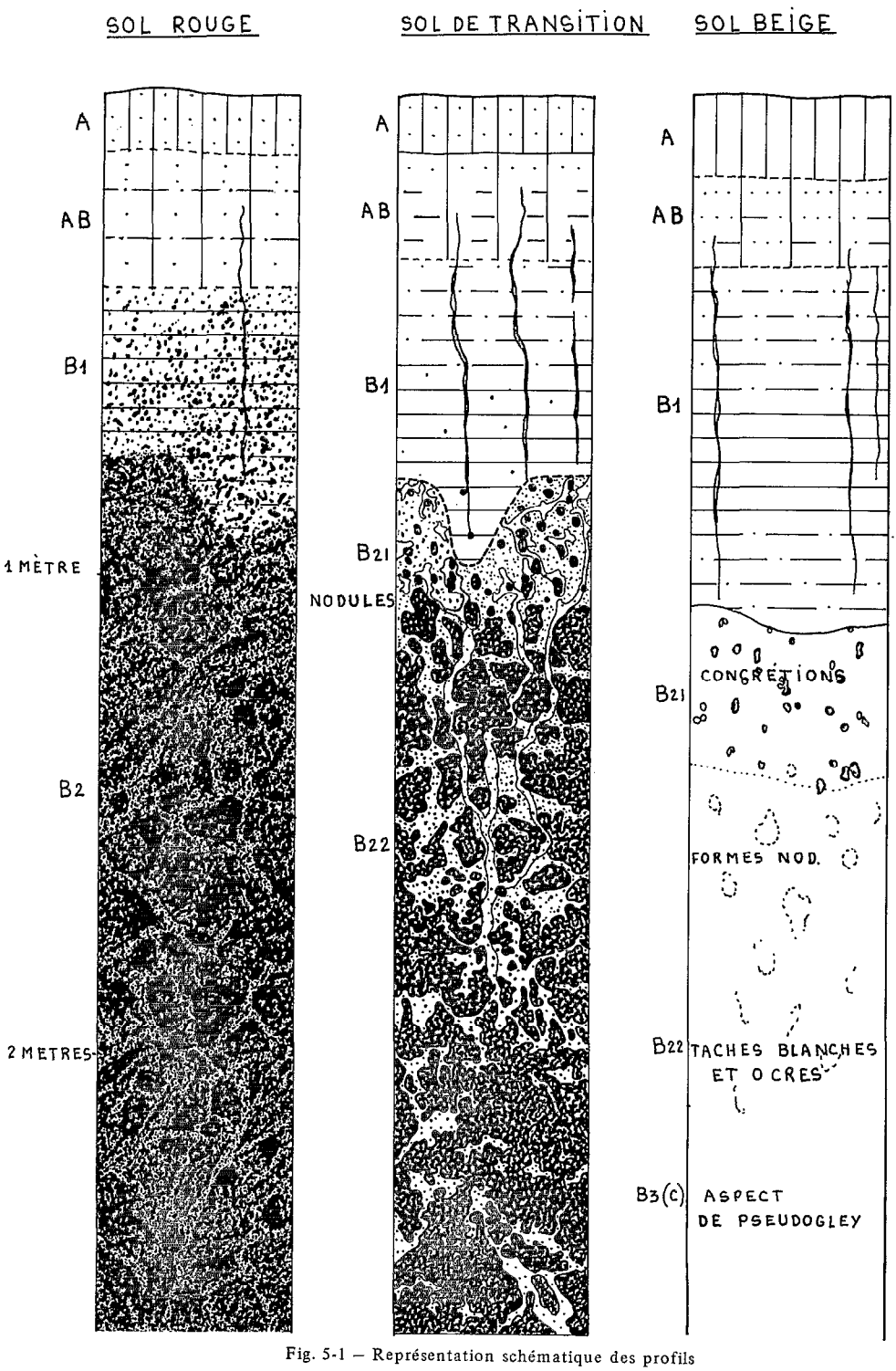


Fig. 5-1 — Représentation schématique des profils

"Termitières - cathédrales" d'un rouge vif, de hauteurs généralement comprises entre 1 et 4 mètres, distantes de quelques dizaines de mètres les unes des autres (5 à 10 par hectare).

Surface couverte de branchages dévorés intérieurement par les termites, de feuilles mortes et de fragments de charbon de bois.

0 - 12 cm - Horizon humifère. Sec. Brun rouge sombre (2, 5 YR3/4), homogène. Sable faiblement argileux, constitué de grains de quartz fins et grossiers, assez propres, souvent incrustés d'oxyde de fer rouge violacé et de quelques micronodules rouges. Structure nuciforme à grumeleuse. Porosité interstitielle et vacuolaire fine et grossière importante. Cohésion faible, friabilité forte. Chevelu dense de radicelles. Forte activité biologique : cavités, coprolithes.
Transition graduelle et régulière, contraste faible.

12 - 40 cm - Horizon AB. Sec. Rouge sombre (2, 5 YR 3/6), hétérogène, à secteurs blanchâtres présentant des quartz propres vers le haut de l'horizon, et des secteurs plus rouges sans quartz visibles vers le bas. Sablo-argileux. Structure massive à débits polyédriques mamelonnés. Quelques petites fentes de retrait (1 mm de large), irrégulièrement réparties. Porosité d'origine biologique importante (tubulaire et vacuolaire, grossière, fine et moyenne). Quelques revêtements argileux sur les parois des vides biologiques. Cohésion moyenne, friable.
Transition graduelle, contraste faible.

40 - 80 cm - Horizon B 1. Sec. Rouge (2, 5 YR 4/6) ; des ponctuations blanches visibles sur les cassures apparaissent à la loupe comme étant constituées par des quartz grossiers, microfissurés, fragmentés. Variation importante de la texture qui devient progressivement plus argileuse, mais masquée, de prime abord, par la présence de "granules" dispersés qui s'écrasent facilement sous la pression des doigts, révèlant alors la nature argileuse de leur ciment. Structure massive, à sous-structure grenue très fine, juxtaposée à une structure polyèdrique très grossière à débits mamelonnés. Fentes de retrait (de 3 mm de large, distantes de 1 mètre). Porosité tubulaire fine et localement interstitielle. Plastique, collant et peu fragile, localement friable et fragile. Traces de racines très lissées tapissant les parois des fentes.
Transition diffuse et irrégulière, contraste faible.

80 - 250 cm - Horizon B 2. Frais. Rouge soutenu (10 R 4/6). La présence de "granules", signalée dans l'horizon B 1, tend ici à se généraliser à toute la masse, contribuant à donner une impression tactile de texture, d'abord sablo-limoneuse, devenant argilo-sableuse au cours du malaxage.

Examiné à la loupe, ce matériau apparaît constitué de très petits granules, soudés les uns aux autres et formant ainsi une structure continue ; seuls certains secteurs, plus ou moins nettement délimités mais non contrastés, sont formés par un empilement lâche des mêmes petits "granules" (structure microgrenue) ; leurs empreintes ayant une forme tubulaire ramifiée ou alvéolaire (mise en évidence par un léger brossage des parois de la tranchée), ils correspondent en fait à des agrotubules (1) (BREWER, 1964), à peine reconnaissables à l'observation directe.
Disparition des fentes de retrait. Porosité interstitielle très fine et tubulaire moyenne. Rares revêtements argileux rouges localisés. Non plastique, peu collant, friable et fragile.
Quelques formes nodulaires (2), à peine cimentées, de couleur peu contrastée par rapport à la matrice (nuance violacée 10 R 3/6) apparaissent progressivement : petites ($\varnothing$ = 5 mm) et rares (10 %), de forme sphérique jusqu'à 1,4 mètre, elles deviennent plus abondantes (30 %) et s'anastomosent localement à 1,6 mètre. Le matériau dont elles sont constituées se morcelle sous la pression des doigts en petits éléments polyédriques ; soumis à l'action de l'eau il résiste ou se défait en fragments qui gardent une rigidité élevée à l'état humide et ne révèlent la nature argileuse de leur ciment qu'à la suite d'une trituration prolongée. Examiné à la loupe, il présente un aspect particulier : les grains de quartz, incrustés d'oxyde de fer, sont fortement enrobés par une pâte rouge à texture très fine, présentent des cassures franches à arêtes anguleuses. Les surfaces de rupture sont brillantes, parfois légèrement lustrées. La porosité, inférieure à celle du fond matriciel, est constituée de fines fissures et de canalicules tapissés de revêtement argileux rouges et brillants. Les limites de ces formes nodulaires sont, localement nettes, soulignées par de petites fissures périphériques, ailleurs diffuses et seulement marquées par une variation progressive de la teinte, de la cimentation et de la porosité.
Transition diffuse, contraste faible.

250 - 500 cm - Horizon B 3. Frais. Rouge (10 R 4/6), hétérogénéité liée à l'apparition de zonations blanchâtres, à limites diffuses, qui tendent à souligner le pourtour des formes nodulaires ou à les pénétrer dans les secteurs poreux ; examinées à la loupe

---

(1) Traits pédologiques formés de grains de squelette et de plasma, ayant une forme tubulaire simple ou ramifiée, correspondant à différents remplissages biologiques de chenaux.

(2) Selon la définition donnée par le glossaire de pédologie (O. R. S. T. O. M., 1969) : éléments indurés, à structure non concentrique, possédant une cohésion supérieure à celle du matériau les englobant.

elles apparaissent constituées par des quartz lavés et des micronodules blancs formant un assemblage granulaire, à porosité interstitielle élevée, localement occupée par des argilanes. Les formes nodulaires, plus abondantes (50 %) s'individualisent mieux ; plus cohérentes, elles présentent sur leur cassure des secteurs dépourvus de quartz ou n'en contenant que de fins éclats. Matrice friable et fragile. Transition diffuse.

500 - 800 cm - Horizon BC. Augmentation progressive des contrastes entre les nodules rouges (10 R 4/6), de plus en plus cohérents, entourés ou pénétrés de zonations blanchâtres qui les recoupent en nodules plus petits ($\simeq$ 1 à 20 mm), et un fond matriciel qui s'éclaircit encore et devient friable et fragile.
Plus en profondeur, les zonations blanchâtres forment un réseau continu ; elles sont formées d'un matériau clair, hétérogène, taché d'ocre jaune, à ponctuations rouges, à organisation grossièrement centrée autour de pores tubulaires fins à parois blanches et ocres ; on y distingue des poches de sable quartzeux et de micronodules et des revêtements argileux localisés, les limites des nodules sont nettes (découpées à "l'emporte-pièce") ou diffuses (marquées par des dégradés de couleur rouge, ocre et jaune). Les nodules eux-mêmes sont rouges, hétérogènes, à nuances sombre, ocre et rouille.

Le tableau 5-2 regroupe les principales données macromorphologiques.

b) Analyse de ces données.

Le profil apparaît composé par 3 ensembles d'horizons, séparés par des transitions graduelles à diffuses peu apparentes :

Horizons A et AB (de 0 à 40 cm). Humifères. De couleur rouge assombrie par de la matière organique, sableux à sablo-argileux.

Horizon B 1 (40 à 80 cm). Rouge. Caractérisé par une variation rapide de la texture, de plus en plus argileuse vers le bas, mais partiellement masquée, de prime abord, par la présence de "granules" dispersés, perçus au toucher comme des sables, ne révèlant la nature argileuse de leur ciment qu'après écrasement sous la pression des doigts.

Horizons B 2 et B 3 (de 80 à 500 cm). Rouge soutenu. Constitué par un assemblage de petits "granules", soudés les uns aux autres (dans le fond matriciel) ou libres (dans les pédotubules), et de formes nodulaires, à peine distinctes vers le haut, mieux individualisées en profondeur.

Tableau 5-2.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU SOL ROUGE.

HORIZONS	COULEUR	TEXTURE	STRUCTURE	POROSITE	FORMES NODULAIRES	REVETEMENTS
0 cm A 12 cm	Brun rouge sombre	Sable argileux	Nuciforme à grumeleuse	Interstitielle et vacuolaire, forte	Absentes	-
12 cm AB 40 cm	Rouge sombre à secteurs plus clairs	Sablo-argileuse	Massive	Tubulaire, vacuolaire et interstitielle, forte	Absentes	Sur les parois des vides biologiques
40 cm B 1 80 cm	Rouge	Argilo-sableuse d'abord masquée par des "granules"	Massive à sous-structure grenue	Tubulaire et interstitielle, forte	Absentes	-
80 cm B 2 250 cm	Rouge soutenu	Masquée dominance des "granules"	Continue, assemblage de grains soudés	Interstitielle et tubulaire forte	A peine distinctes, plus abondantes vers le bas	Limités aux formes nodulaires
250 cm B 3 500 cm	Rouge soutenu + zonations claires	Masquée dominance de "granules"	Continue et fragmentaire	Interstitielle et tubulaire, forte	Mieux individualisées et abondantes	Localisés, dans les zonations claires
500 cm BC 800 cm	Hétérogène à dominante rouge	Hétérogène	Fragmentaire	Insterstitielle et tubulaire forte	Nodules plus cohérents	Localisés

Ces horizons sont eux-mêmes constitués par l'association de 3 matériaux différents :

- mélange de sable (quartz incrusté d'oxyde de fer) et d'argile rouge en quantité variable, donnant, après humectation une impression de texture franche et constante au cours du malaxage,

- très "petits granules" rouges ($\varnothing$ = 0,1 mm), dispersés dans l'horizon B 1 ou seule les révèle une impression tactile fugace, dominants et assemblés en une structure continue poreuse dans les horizons B 2 et B 3. Leur texture argileuse n'est perçue qu'après une légère pression des doigts,

- formes nodulaires et nodules rouges de dimensions centimétriques, peu contrastés, à peine distincts du fond matriciel. La présence d'argile n'y est décelée qu'après une trituration prolongée.

L'existence de formes de transition entre ces matériaux donne à l'ensemble du profil une apparence d'homogénéité :

- Les formes nodulaires ne présentent que localement des limites nettes; ailleurs une variation progressive de la cimentation et de la porosité marque le passage au fond matriciel (la porosité tubulaire et fissurale devient, à ce niveau, interstitielle).

- Les "granules", dominants dans l'horizon B 2, semblent être également présents bien que dispersés et moins reconnaissables dans l'horizon B 1 et jusqu'au niveau de l'horizon humifère.

Le mot "granule", utilisé ici, recouvre à la fois une propriété perçue surtout au toucher dans l'horizon B 1, et un aspect morphologique dominant dans les horizons B 2 et B 3. Il n'est pas évident toutefois que les organisations ainsi reconnues soient identiques, et qu'il ne faille pas aussi leur adjoindre les micronodules rouges observés dans les sables quartzeux de l'horizon A. Seule l'étude des assemblages élémentaires correspondants, par les techniques de l'analyse micromorphologique, permettra ultérieurement de mieux connaître ces organisations et de les désigner par des termes plus précis (chap. 9).

Pour l'instant il nous est seulement possible de constater cette

tendance générale qui caractérise le profil de sol rouge. La façon dont elle se manifeste est en étroite relation avec la texture et avec la morphologie des vides d'une part, et avec les humidités appréciées sur le terrain 2 mois et demi après les pluies (janvier 1970) d'autre part (tableau 5-3). Cette caractéristique, encore mal définie semble donc être une des propriétés les plus remarquables du profil de sol rouge.

Tableau 5-3.

GRANULATION, TEXTURE ET HUMIDITE DU SOL ROUGE EN SAISON SECHE.

HORIZONS	"GRANULATION"	TEXTURE	POROSITE formes dominantes	HUMIDITES Janvier 1970
A et AB	micronodules rouges mélangés aux sables	S à S.A.	interstitielle	sec
B 1	"granules" dispersés perçus au toucher	A. S. d'abord masquée	tubulaire	sec
B 2 et B 3	dominance de "granules" soudés, reconnaissables	fortement masquée S. L. puis A.S	interstitielle	frais

c) Variations morphologiques autour du profil type de sol rouge.

Les profils 14 - 12 - 11 et 10 de la toposéquence, ainsi qu'une trentaine d'autres situés en position comparables dans la région de Séfa, mettent en évidence une homogénéité d'ensemble, mais aussi l'existence de variations morphologiques discrètes et localisées n'affectant que la partie supérieure du profil.

Elles sont, dans de nombreux cas limitées à des taches, plus ou moins circulaires, de diamètre inférieur à quelques dizaines de mètres, dont l'existence n'est révélée par aucune particularité évidente de l'état de la surface ni de la végétation. Aussi est-il arrivé que des tranchées soient creusées par hasard sur les limites de telles zones, permettant alors d'observer des variations discrètes de la couleur et de l'état structural des horizons superficiels, manifestées sur une distance de 1 à 2 mètres.

- La couleur brun rouge sombre (2, 5 YR 3/4) se nuance de teintes plus jaunes (5 YR 4/2), tandis que des zonations brunes apparaissent dans l'horizon AB et la partie supérieure de l'horizon B 1.

- Simultanément, la structure se modifie dans la même partie du profil, tendant à devenir massive dans l'ensemble , et localement polyédrique très grossière, peu développée dans les horizons AB et B 1.

Quelques dizaines de mètres plus loins dans l'axe d'une toposéquence se retrouvent des profils de sol rouge typique, comparables au profil 13.

Un lever topographique révèle que ces taches sont liées au micro-relief mamelonné propre aux sols rouges maintenus sous végétation forestière et qu'elles correspondent en fait à de petites cuvettes évasées dont la profondeur ne dépasse quelques décimètres. Leur origine reste problématique ; peut-être faut-il y voir la trace laissée par de grands arbres abattus par les tornades, puis détruits par le feu et les termites, ne laissant qu'une excavation qui s'évase et disparaît progressivement.

Retenons donc qu'il existe dans les surfaces occupées par les sols rouges typiques, sous forêt conservée, de petites taches dispersées caractérisées par une hétérogénéité de l'état des horizons superficiels.

D'autres variations morphologiques comparables, affectant de plus vastes zones ont été, après enquête et observation plus détaillée de la végétation, considérées comme les traces d'anciennes défriches partielles, temporairement cultivées, puis rendues à la forêt.

d) Conclusions.

Les sols typiques, caractérisés par une différenciation faible, et surtout peu apparente, des horizons pédologiques, laissent entrevoir, par delà une homogénéité très remarquable, encore accrue par l'uniformité de la couleur, une organisation complexe formée de petites unités tridimensionnelles (granules et formes nodulaires) qui ne pourront être définies de façon précise qu'à l'aide du microscope.

Des variations très localisées des caractères morphologiques des horizons superficiels sous forme de taches semblent être les indices d'une tendance évolutive actuelle, dépendante du micro-relief et de la couverture végétale.

2/ - Les sols de transition.

Marquant le passage des sols rouges aux sols beiges, les sols de transition ont aussi des caractéristiques morphologiques qui leur sont propres.

Ils occupent une frange étroite (200 mètres) en bordure de la surface convexe, dont la pente est un peu supérieure à celle des sols rouges (1 à 3 %).

Leur aspect le plus remarquable apparaît dans le profil 6. Avant d'en donner une description détaillée, il convient d'examiner les variations latérales manifestées depuis le sol rouge jusqu'à ce niveau de la toposéquence (profils 9, 8 et 7).

a) Variations latérales des caractéristiques morphologiques depuis le sol rouge jusqu'au profil type .

Ces variations portent principalement sur la couleur, la texture, la structure et l'état des formes nodulaires.

- Modification de la couleur.

Au niveau du profil 9 : développement de la coloration brun rouge (2, 5 YR 4/4) dans l'horizon AB jusqu'à 37 cm, puis passage à une couleur rouge (2, 5 YR 4/6) analogue à celle du profil 13 mais nuancée par des zonations brunes qui s'étendent jusqu'à 60 centimètres.

Au niveau du profil 8 : sous un horizon A 1 gris rouge foncé (5 YR 4/2) les colorations brun rouge évoluent vers des nuances plus jaunes (5 YR 4/4 à 5/4) de 12 à 30 cm, puis apparaît un niveau rouge jaune de 30 à 40 cm et le passage à une couleur d'un rouge soutenu (10 R 5/6) se fait par l'intermédiaire de nuances plus claires jusqu'à 55 cm.

Au niveau du profil 7 : les couleurs à nuances plus jaunes et plus claires gagnent en profondeur dans le profil. Sous un horizon humifère gris rouge (5 YR 5/2) s'observe une gradation de couleur allant du brun rouge (5 YR 5/4) au jaune rouge (5 YR 6/6) vers 30 cm, puis au rouge clair (2, 5 YR 6/8) jusqu'à 110 cm.

Les variations latérales se manifestent donc par le développement de colorations brunes, rouge jaune et jaune rouge dans l'horizon AB, par une pénétration de zonations brunes, puis par un éclaircissement dans l'horizon rouge sous-jacent.

- Modification de la texture.

Au niveau du profil 9, sous l'horizon humifère sableux, faiblement argileux s'observent de brusques variations verticales

de texture, particulièrement nettes dans la partie inférieure de l'horizon AB (passage d'une texture sablo-argileuse à argilo-sableuse) et dans l'horizon B 1 entre 45 et 55 cm (passage d'une texture argilo-sableuse à argileuse). L'impression tactile stable, non influencée par la présence de "granules", révèle que la texture des horizons AB et B 1 est ici nettement plus argileuse que celle des horizons équivalents du profil de sol rouge typique. Celle des horizons B 2, moins immédiatement perceptible, révèle cependant un caractère argileux plus accusé que dans le profil 3.

Au niveau du profil 8 : la différenciation texturale observée dans l'horizon B 1 (entre 35 et 55 cm) s'accentue encore.

Au niveau du profil 7 : une forte variation texturale apparaît à nouveau dans l'horizon AB (de 25 à 35 cm). Le contraste textural s'accuse au sein même de l'horizon B 2 entre le matériau nodulaire plus cimenté, à caractère argileux peu perceptible et la matrice argilo-sableuse.

Les variations latérales de texture correspondent ainsi :

- à une accentuation de la différenciation des horizons AB et B 1, à caractère plus argileux, marquée par des variations verticales brusques (coïncidant sensiblement avec les limites de coloration observées),
- au développement de contrastes entre le matériau nodulaire (où la présence d'argile devient de moins en moins perceptible à mesure que se développe une cimentation) et le fond matriciel argilo-sableux.

- Modification de la structure.

Les variations latérales observées dans les 3 profils marquent une évolution vers des structures

- grumeleuses moins bien définies à tendance nuciforme ou même massive dans l'horizon A,
- polyédrique très grossière à massive, peu nette, à débits horizontaux dans l'horizon AB et l'horizon B 1 ou s'élargissent les fentes de retrait,
- hétérogène dans les horizons B 2 et B 3 où les pédotubules gardent une structure microgrenue tandis que le fond matriciel devient massif à polyédrique.

- Modification de l'état des formes nodulaires.

Abondantes mais à peine différenciées et se développant progressivement avec la profondeur dans les horizons B 2 et B 3 du profil de sol rouge typique, les formes nodulaires s'individualisent de plus en plus nettement jusque dans la partie supérieure de l'horizon B 2. Elles y apparaissent d'autant plus distinctes dans le profil 7 que le contraste y est encore accru par l'éclaircissement du fond matriciel : de formes arrondies ou contournées, à coloration rouge nuancée de "rouille" entre 80 et 155 cm, elles s'entourent d'un léger liseré rose-mauve à partir de 155 cm et présentent, à cette

profondeur des limites nettes, découpées comme "à l'emporte-pièce" avec le matériau à structure grenue des pédotubules.

Les variations latérales observées se traduisent donc par une individualisation croissante des formes nodulaires, due à la fois à l'accentuation du contraste par éclaircissement du fond matriciel de haut en bas, et au découpage de ces formes nodulaires par des "pédotubules" en profondeur.

Dans ces 3 premiers profils de sol de transition sont donc observées des variations latérales discrètes, seulement révélées par des nuances de couleur dans les horizons A, AB et B 1, par une gradation des caractéristiques structurales, par l'appréciation tactile de la texture et de la consistance et par l'observation de formes nodulaires peu contrastées.

Certaines de ces variations n'affectent que les horizons superficiels et sont comparables à celles relevées comme des hétérogénéités dans la zone de sol rouge, mais d'autres intéressent les horizons plus profonds (en particulier l'individualisation des formes nodulaires).

A ce niveau de la toposéquence, il suffit de parcourir 20 mètres pour passer au profil 6 dont la différenciation est beaucoup plus apparente.

b) Description du profil 6.

Végétation = forêt claire.

- strate arborée un peu moins développée qu'aux alentours du profil de sol rouge avec cependant quelques très beaux arbres Kaya sénegalensis, Pterocarpus erinaceus.
- rares touffes de bambous (Oxythenanthera abyssinica)
- tapis herbacé dense d'andropogonées.

La plupart des troncs d'arbres sont recouverts par des placages de terre rose remontée par les termites.

Surface couverte d'une mince litière (1 cm) composée d'herbes mortes et de feuilles d'arbres.

0 - 12 cm - Horizon humifère. Sec. Brun gris rouge (5 YR 4/3), hétérogène, à secteurs rougeâtres et gris brun. Texture à dominante sableuse, hétérogène (concentrations argileuses autour des vides biologiques). Structure nuciforme peu nette à massive peu cohérente, juxtaposée à une structure grumeleuse limitée au pourtour des vides biologiques. Porosité interstitielle très développée dans le matériau sableux, tubulaire, vacuolaire et vésiculaire ailleurs.
Revêtements organo-argileux, complexes, gris rougeâtre,

épais, associés aux vides biologiques. Rigide, friable et fragile. Chevelu radiculaire important dans les secteurs grumeleux. Très forte activité biologique : turricules, galeries, cavités...
Transition distincte, contraste faible.

12 - 35 cm - Horizon AB. Sec. Variation rapide mais progressive de la couleur : brun rouge (5 YR 5/4) puis rouge jaune (5 YR 5/6) avec pénétrations grises, et de la texture : sablo-argileuse puis argilo-sableuse hétérogène (secteurs plus sableux). Structure massive à éclats émoussés. Quelques fentes de retrait très fines, verticales et obliques, irrégulièrement réparties. Porosité peu importante, tubulaire, vacuolaire et vésiculaire très fine et large, juxtaposée à une porosité interstitielle très fine dans les secteurs sableux. Revêtements argileux associés aux vides tubulaires. Plastique et collant, localement friable. Cohésion forte. Racines dans les pores tubulaires. Activité biologique moyenne : nids, coprolithes et galeries.
Transition graduelle, contraste faible.

35 - 80 cm - Horizon B 1. Sec. Jaune rouge (5 YR 6/6 puis 5 YR 5/6). Variation progressive de la texture qui devient franchement argileuse à 60 cm. Structure polyédrique grossière, peu nette puis moyenne à débits mamelonnés. Fentes de retrait de 0,3 cm de large en "marches d'escalier". Porosité tubulaire très fine et porosité interstitielle limitée à de rares agrotubules. Revêtements argileux associés aux vides. Plastique, collant, peu friable dans l'ensemble, cohésion moyenne. Racines rares dans les fentes et les vides tubulaires.
Transition distincte et irrégulière.

80 - 110 cm - Horizon B 21 Sec. Rouge clair (2,5 YR 6/8). Argilo-sableux, caractérisé par la présence de formes nodulaires rouges (10 R 4/6), petites ($\varnothing$ 1 à 10 mm), peu abondantes (moins de 10 %), contrastant nettement avec le fond matriciel. Structure d'ensemble polyédrique moyenne à fine peu nette. Agrotubules nombreux emplis de grains de sable et de micro-agrégats. Porosité irrégulièrement répartie : faible et tubulaire fine dans le fond matriciel, très forte et interstitielle dans les pédotubules. Les formes nodulaires sont irrégulièrement arrondies, à limites très nettes, finement sinueuses, rendues plus apparentes par un léger assombrissement de leur bordure et par le développement d'une porosité importante qui les enveloppe, partiellement comblée par des revêtements argileux gris blanc jaunâtre ; leurs cassures, de forme polyédrique mettent à jour des quartz propres incrustés d'oxyde de fer, irrégulièrement répartis ainsi que des vides tubulaires et fissuraux aux parois revêtues d'argile rose grisâtre et des invaginations emplies de micronodules rouges enveloppés par des argilanes clairs ; plus cimentées que la matrice, elles s'en isolent facilement mais s'écrasent à l'état

humide sous une forte pression des doigts, donnant une impression immédiate de texture sablo-limoneuse et ne révèlant que très progressivement la présence d'argile par l'effet du malaxage.
Transition diffuse et irrégulière.

110 - 250 cm - Horizon B 22. A peine frais. Augmentation progressive de la proportion de formes nodulaires, d'un rouge plus clair (10 R 5/8) qui deviennent dominantes et s'anastomosent en un ensemble complexe, finement découpé par des agrotubules formant un réseau continu à dominance verticale, empli d'un matériau hétérogène à structure grenue composé de quartz et de micronodules rouges, roses et blancs, localement enveloppés par des argilanes clairs. La périphérie des formes nodulaires tend elle-même à s'éclaircir, passant par des nuances mauves à des teintes blanchâtres ; cet éclaircissement se développe à partir des fissures qui découpent les formes nodulaires en éléments plus petits, ne laissant subsister que des noyaux et ponctuations rouges (fig. 5-2) ; la cimentation reste nette, mais la fragilité de l'ensemble est fortement accrue.
Transition diffuse et irrégulière.

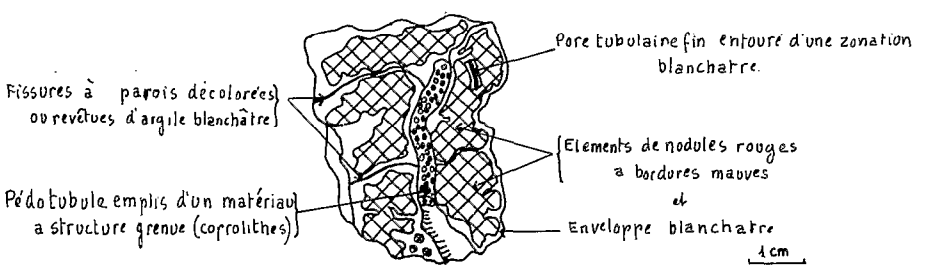


Fig. 5-2 - Disposition relative des nodules et pédotubules à 2 mètres de profondeur.

250 - 500 cm - Horizon B 3. Frais. Le matériau nodulaire rouge (10 R 5/6) devient encore plus abondant mais se morcelle en éléments plus petits et laisse place à des poches de matériau rose clair (5 YR 8/2) ; une porosité interstitielle importante y isole des micronodules et des grains de quartz ; seuls quelques noyaux plus denses, arrondis, d'un rouge plus sombre (10 R 4/6) gardent une porosité essentiellement tubulaire, ils ne représentent pas plus de 30 % du volume.

Le tableau 5-4 regroupe les données morphologiques les plus évidentes relatives à ce profil.

Tableau 5-4.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU SOL DE TRANSITION.

	COULEUR	TEXTURE	STRUCTURE	POROSITE	FORMES NODULAIRES	REVETEMENTS
0 A 12 cm	Brun gris rouge	à dominante sabl. hétérogène	Nuciforme peu nette à massive, et localement grumeleuse	interstitielle, tubulaire vacuolaire et vésiculaire très forte	-	Organo-argileux sur les parois des vides biologiques
12 cm AB 35 cm	Brun rouge Rouge jaune	sablo-argileuse argilo-sabl.	Massive	tub. vac. et vés. peu importante	-	Argileux associés aux vides tubulaires
35 cm B 1 80 cm	Jaune rouge	argileuse	Polyédrique grossière, peu nette	Fiss. + tub. très fine, peu importante	-	Argileux associés aux vides fissurés et tub.
80 cm B 21 110 cm	Rouge clair	argilo-sabl.	Polyéd. moy. à fine, peu nette local. micro-grenue	- Tub. fine, faible dans le F. M. - Int. très forte dans les agro-tubules	Rouges, petites et contrastées	Argileux limités aux agrotubules
110 cm B 22 250 cm	Rouge clair	argilo-sabl.	Polyéd. peu nette, localement microgrenue	- Tub. fine, faible dans le F. M - Int. très forte dans les agro-tubules.	Rouge clair dominantes à pourtours éclaircis, fragmentées	Argileux limités aux agrotubules
250 cm B 3	Rose clair et rouge	hétérogène	hétérogène	Int. dominante tub. localisée	Rouges fragmentées	

c) Analyses de ces données.

On observe :

1) La succession des mêmes horizons que dans le sol rouge typique, à des profondeurs comparables.

Cependant :
- les variations de couleur entraînent une différenciation beaucoup plus apparente des horizons,
- la transition est cette fois distincte entre l'horizon B 1 jaune rouge et l'horizon B 2 rouge clair à formes nodulaires rouges,
- dans ce dernier se différencient deux sous-horizons selon l'abondance et l'évolution des formes nodulaires.

2) L'association de matériaux comparables à ceux du sol rouge (mélange de sable et d'argile, "granules" et formes nodulaires).

Cependant :
- les différences sont plus accusées entre eux, en ce qui concerne la couleur (sable et argile teintés de brun, gris, jaune, rouge clair - "granules" sous formes de ponctuations rouges, formes nodulaires rouges) et en ce qui concerne la consistance (argile plastique et collante - granules friables - formes nodulaires cimentées et localement friables),
- chaque type de matériau tend à être regroupé en des domaines séparés des autres par des discontinuités : dominance de matériaux sablo-argileux à argileux, donnant une impression tactile de texture stable dans les horizons A, AB et B 1 - formes nodulaires isolées et noyées dans le matériau argilo-sableux de l'horizon B 21 mais formant un continuum, finement découpé par un réseau d'agrotubules dans l'horizon B 22 - matériau granulaire surtout observé dans les agrotubules.

3) Des indices de transformation et de transport dans tous les horizons.
- revêtements organo-argileux associés aux vides dans les horizons A, AB et B 1,
- assombrissement de la bordure des formes nodulaires

isolées de l'horizon B 21,

- décoloration de la bordure des formes nodulaires anastomosées, recoupées par le réseau d'agrotubules dans les horizons B 22 et B 3,
- morcellement des formes nodulaires par fissuration,
- emplissage des vides périnodulaires, de la porosité interne des nodules et des vides interstitiels des agrotubules par des argilanes blanc jaunâtre et roses.

d) Variations latérales au-delà du profil décrit.

Le profil 5, observé 60 mètres au-delà du profil 6, se distingue par l'accentuation de la différenciation en horizons, ainsi que par un éclaircissement global de la partie inférieure du profil (horizons B 2 et B 3) dans laquelle s'accroît encore l'hétérogénéité de la couleur (dominante rose clair, ponctuations rouges, liserés blancs à jaunâtres autour des formes nodulaires).

e) Conclusions.

Les sols de transition ne sont pas définis par la description d'un seul profil type, mais par la gradation des caractéristiques morphologiques mises en évidence sur une série de coupes échelonnées au travers d'une frange étroite séparant les sols rouges des sols beiges.

En se déplaçant des premiers vers les seconds, on relève des variations latérales, d'abord discrètes, puis de plus en plus nettement exprimées sur quelques dizaines de mètres, de telle sorte qu'on semble se trouver devant un contact tranché entre sols différents ; et cependant les observations détaillées et serrées ne mettent en évidence aucune rupture de continuité, à l'échelle des horizons, à ce niveau de la toposéquence.

Ces variations se manifestent en premier lieu, de façon visible, dans la partie supérieure du profil (par des couleurs plus jaunes et par le développement de structures plus massives dans les horizons A et AB et polyédrique grossière peu nette dans l'horizon B 1) puis, à peine plus loin dans les horizons B 2 et B 3 (individualisation de formes nodulaires et éclaircissement du fond matriciel dont la couleur reste cependant rouge).

3/ - Les sols beiges.

Au-delà de la pente faible occupée par les sols de transition s'étend une surface sensiblement plane sur laquelle s'effectue progressivement le passage au sol beige typique.

a) Variations latérales depuis les sols de transition jusqu'au profil de sol beige décrit.

Ces variations portent, là encore sur : la couleur, la texture, la structure et l'état des formes nodulaires.

- Modification de la couleur

Au niveau du profil 4, la succession des couleurs dans les horizons A, AB et B 1 reste comparable à celle du sol de transition, mais affecte des profondeurs plus importantes (18-50 et 110 cm). Seule se modifie la teinte du fond matriciel de l'horizon B 2 qui devient brun rouge clair tandis que les formes nodulaires incluses restent rouge (10 R 5/6).

Au niveau du profil 3, on retrouve les mêmes colorations jusqu'à 1,10 mètre ; plus bas, les formes nodulaires rouge brique (10 R 4/6), à nuances "rouille" ne sont nettement individualisées qu'entre 130 et 170 cm ; au-dessous, le matériau est très hétérogène et bigarré de rouge, rouge clair, jaune et brun (2,5 YR 5/8, 5YR 6/6, 7,5 YR 5/8).

Les variations de couleur affectent donc ici principalement les horizons profonds ; la couleur rouge cesse d'y être dominante et se limite aux formes nodulaires alors que le matériau tend à prendre un aspect bigarré où se reconnaissent des teintes brunes.

- Modification de la texture

Au niveau du profil 4, la texture sableuse de l'horizon humifère gagne en profondeur et ne passe que progressivement (de 20 à 40 cm) à des textures sablo-argileuses puis argilo-sableuses ; l'horizon B 1 est argileux ; les horizons B 2 et B 3, moins riches en formes nodulaires sont, dans leur ensemble, argilo-sableux.

Dans le profil 3, la progressivité des variations texturales est encore plus marquée (aucune variation brusque n'étant observée entre 0 et 60 cm), elle résulte d'un allègement de la texture de l'horizon AB, de 18 à 50 cm à dominante sablo-argileuse ; l'horizon B 1 est argileux, les horizons B 2 et B 3 argilo-sableux.

La variation latérale observée dans cette partie de la toposéquence se manifeste donc :

+ par la rectification des variations texturales qui caractéri-

saient les horizons AB de sol de transition, liée à l'extension progressive vers la profondeur des textures sableuses et sablo-argileuses,

+ par la généralisation des textures argilo-sableuses dans les horizons plus profonds B 2 et B 3.

- Modification de la structure

Au niveau du profil 4, la structure massive s'étend plus en profondeur dans le profil jusqu'à 50 cm, elle évolue vers une structure polyédrique large dans l'horizon B 1 où se développe des fentes de retrait, et vers une structure polyédrique grossière, peu nette, émoussée dans les horizons B 2 et B 3.

Dans le profil 3, la structure massive se développe encore en contraste avec celle de l'horizon B 1 où les fentes de retrait délimitent nettement des éléments polyédriques grossiers.

La variation latérale est donc marquée surtout par le développement d'une structure massive dans les horizons A et AB, par la différenciation d'un horizon B 1 grossièrement polyédrique, et par l'évolution des horizons plus profonds vers une structure polyédrique grossière émoussée.

- Modification de l'état des formes nodulaires

Dans le profil 4, les formes nodulaires ne sont largement représentées (> 10 %) qu'entre 120 et 200 cm, localement anastomosées, elles présentent vers le haut un cortex rouge foncé à violacé, mais tendent à se morceler vers le bas en éléments plus petits et friables, disséminés dans la masse du matériau.

Dans le profil 3, elles apparaissent à 130 cm, d'abord petites et arrondies, elles ont plus bas des formes découpées et des couleurs rouge foncé à violacé, très contrastées par rapport au fond matriciel, un cortex sombre et des limites nettes. A partir de 170 cm leurs limites s'estompent tandis que leur périphérie s'éclaircit et que des zonations roses les entourent. Seuls quelques "noyaux" rouge, de forme contournée, à forte porosité tubulaire, sont observées en-dessous de 2 mètres.

La variation latérale observée correspond ainsi :

+ d'une part à la différenciation des formes nodulaires situées dans la partie supérieure de l'horizon B 2 qui se nuancent de teintes violacées et s'entourent d'un cortex sombre.

+ d'autre part, à l'éclaircissement, la fragmentation et la dissémination des formes nodulaires situées dans les horizons plus profonds.

Dans cette partie de la toposéquence, la surface du sol est sensiblement plane et les dénivelées observées d'un profil à l'autre ne dépassent pas quelques décimètres. C'est à ce niveau que s'effectue le passage entre des sols encore partiellement colorés de rouge et les sols beiges typiques.

b) Description du profil 2.

- Végétation : il est situé dans une bande forestière conservée entre des parcelles cultivées
  - strate arborée sensiblement moins développée que dans les profils précédents, avec quelques grands arbres : Ptérocarpus erinaceus, Bombax costatum,
  - strate arbustive peu importante (Combretum sp.)
  - tapis herbacé assez lâche (grosses touffes d'Andropogon)

  Surface couverte de débris organiques en décomposition.

0 - 17 cm - Horizon humifère. Sec. Brun sombre (7, 5 YR 4/2), hétérogène, à secteur gris autour des vides biologiques et zonations grises diffuses. Texture sableuse hétérogène, à concentrations organo-argileuses autour des vides biologiques, poches de sables grossiers arrondis, sales, à cutine brune, rarement incrustés d'oxyde de fer rouge violacé ; fond matriciel composé de sable fin et grossier, irrégulièrement cimenté par de l'argile. Structure massive associée à une structure grumeleuse localisée. Porosité interstitielle très fine et tubulaire, vacuolaire moyenne et grossière très développée. Friable et fragile. Racines et radicelles très nombreuses dans la masse de l'horizon. Forte activité biologique : nids, galeries. Transition distincte, contraste faible.

17 - 35 cm - Horizon AB. Sec. Brun (7, 5 YR 4/2 à 5/2), à nuances grises localisées. Sable faiblement argileux. Structure massive à débits polyédriques. Amorces de fentes de retrait. Porosité interstitielle fine et tubulaire très fine et moyenne peu importante, porosité large d'origine biologique très élevée. Revêtements argileux minces associés aux vides tubulaires. Friable et peu fragile. Transition distincte, contraste faible.

35 - 110 cm - Horizon B 1. Sec. Variation progressive de la couleur : brun (7, 5 YR 5/4) puis brun clair (7, 5 YR 6/4) puis brun très pâle (10 YR 7/4), hétérogène, à taches diffuses, ocres vers 40-50 cm, ocre rouille et grisâtres entre 85 et 110 cm dans les secteurs peu poreux, et de la texture : sablo-argileuse puis argilo-sableuse et argileuse, devenant un peu moins argileuse à partir de 85 cm. Structure polyédrique très grossière, peu nette. Fentes de retrait de 0, 3 cm de large, distantes de 10 à 50 cm. Porosité des agrégats faible, tubulaire très fine et localement vésiculaire. Revêtements argileux minces associés aux vides. Plastique,

collant, non friable et non fragile. Racines tapissant les parois des fentes de retrait.
Transition distincte et irrégulière.

110 - 140 cm - Horizon B 21. Sec. Caractérisé par la présence de nodules à cortex ou "concrétions" (1), de couleur rouge brun à ocre rouille, de dimensions centimétriques contrastant nettement avec une matrice identique à celle de l'horizon B 1, brun très pâle (10 YR 7/4), argilo-sableuse, à structure polyédrique grossière et fentes de retrait plus rares. Ces "concrétions" représentent moins de 5 % du volume, elles sont arrondies ou allongées verticalement, leurs limites très nettes sont marquées localement par un cortex noir à surface patinée et par une enveloppe poreuse, tapissée de revêtements argileux blancs ; plus cimentées que la matrice, elles s'en isolent facilement et s'écrasent, sous une forte pression des doigts en petits éléments rigides ; leurs cassures font apparaître des colorations plus claires (ocre rouille) en leur centre qu'à la périphérie, des quartz grossiers et fins, arrondis, corrodés, incrustés d'oxydes de fer, irrégulièrement répartis, ainsi que des fissures et des pores tubulaires et localement interstitiels (isolant des micronodules) emplis d'argilanes blanchâtres, aux parois mauves décolorées.
Transition diffuse et irrégulière.

140 - 210 cm - Horizon B 22. Frais . Les "concrétions" font place progressivement à des formes nodulaires plus abondantes, de couleur brun rouge pâle (2, 5 YR 5/4), de dimensions plus grandes, finement découpées, localement regroupées ou anastomosées dans un fond matriciel de couleur plus grise, envahi par des zonations blanchâtres, à structure polyédrique grossière émoussée peu nette. Sans fentes de retrait. Friable et fragile.
Ces formes nodulaires ne présentent aucune solution de continuité avec les concrétions observées plus haut, leur plus grande abondance est atteinte entre 150 et 180 cm ; friables et fragiles, elles s'écrasent facilement sous les doigts donnant une impression de texture sablo-limoneuse puis argilo-sableuse ; à partir de 180 cm, leurs bordures se teintent de couleur rose clair (7, 5 YR 7/4) et présentent des limites diffuses avec un fond matriciel devenu hétérogène par développement de taches blanchâtres et ocres ; un réseau d'agrotubules, emplis d'un matériau très pâle, hétérogène, à ponctuations rouges et structure grenue, recoupe à la fois le fond matriciel et les formes nodulaires ; une

---

(1) Selon le glossaire de pédologie (O.R.S.T.O.M. 1969) "les concrétions se distinguent des nodules par leur structure concentrique". La différenciation d'un cortex à la périphérie des nodules les apparente donc aux concrétions. Ce dernier terme est, pour cette raison, appliqué aux éléments indurés contenus dans les sols beiges.

deuxième série de fentes de retrait apparaît à ce niveau et se développe plus en profondeur.
Transition diffuse et irrégulière.

210 - 360 cm - Horizon B 3 (C). Frais. Accroissement progressif de l'hétérogénéité du matériau qui prend l'aspect d'un pseudogley : dans un matériau brun clair (7, 5 YR 6/4), les taches blanchâtres teintées d'ocre, à nuances verdâtres et reflets moirés prennent de l'extension (25 %), elles sont en continuité avec quelques lambeaux de formes nodulaires, brun rouge, verticaux (5 %) ; l'ensemble est recoupé par des agrotubules, formant un réseau à dominante verticale, qui contiennent un matériau à structure microgrenue, très hétérogène (blanc, brun, ocre, rouge et rose). La texture d'ensemble est argilo-sableuse. La structure est polyédrique grossière peu nette, à sous-structure polyédrique fine à microgrenue. Porosité interstitielle dans les agrotubules, localement comblée par des revêtements argileux blanchâtres. Racines verticales.

Le tableau 5-5 regroupe les données morphologiques les plus apparentes relatives à ce profil.

c) Analyse des données morphologiques.

La différenciation de ce profil est donc exprimée par la séquence des horizons suivants :

A - Brun sombre, sableux, hétérogène, à structure massive associée à une structure grumeleuse localisée.

AB et B 1 - Gradation de la couleur (allant du brun au brun très pâle), de la texture (sablo-argileuse à argileuse) et de la structure (massive à débits polyédriques puis polyédrique très grossière peu nette).

B 2 - Dans un fond matriciel brun très pâle, progressivement envahi de zonations blanchâtres, à structure polyédrique grossière émoussée, se distinguent des formes nodulaires, d'abord brun-rouge, arrondies et présentant un cortex (qui les apparente aux concrétions) puis plus claires, découpées, localement anastomosées, friables, décolorées à leur périphérie, recoupées par un réseau d'agrotubules.

B 3 (C) - L'ensemble hétérogène prend l'aspect bariolé d'un pseudogley* où se reconnaissent encore des formes nodulaires, en continuité avec des taches blanchâtres, recoupées par des agrotubules.

---

* Ce terme est ici utilisé sans référence précise à sa signification génétique.

Tableau 5-5.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU SOL
- DE TRANSITION.

	COULEUR	TEXTURE	STRUCTURE	POROSITE	FORMES NODULAIRES	REVETEMENTS
0 A 17 cm	Brun sombre	Sabl. hétérogène (conc. argileuses autour des vides biologiques)	Massive associée à une structure grum. localisée	Int. très fine et tub. vac. moy. et grossière très développée	-	-
17 cm AB 35 cm	Brun à nuances grises localisées	Sable faiblement argileux	Massive à débits polyédriques	Int. fine et tub. très fine + porosité large d'origine biologique	-	Argileux minces associés aux vides biologiques
35 cm B 1 110 cm	Brun, puis brun clair et brun très pâle, hétérogène, tache d'ocre rouille et gris	Sablo-argileuse argilo-sableuse argileuse	Polyédrique très grossière peu nette	Fentes de retrait + porosité tub. très fine peu importante	-	Argileux, mince associés aux vides
110 cm B 21 140 cm	Brun très pâle	Argilo-sableuse	Polyédrique grossière	Fentes de retraits rares fiss. et tub. et int. localisée	"concrétions" rouge brun à ocre rouille, à cortex noir, 1 cm	Argilanes blanchâtres autour et dans les vides des "concrétions"
210 cm B22(C) 360 cm	Brun gris, très pâle, hétérogène à zonations blanchâtres	Argilo-sableuse	Polyédrique, grossière émoussée peu nette	Int. dans les agrotubules Fentes de retrait	Brun rouge pâle fragiles à bordures décolorées	
210 cm B 3(C) 360 cm	très hétér. brun clair, blanc, ocre verdâtre, brun rouge	Argilo-sableuse	Polyéd. grossière peu nette, à sous-structure microgrenue	Int. dans les agrotubules	peu abondantes en lambeaux rouge	Argilanes blanchâtres dans les agrotubules

Trois matériaux différents par la gradation de leur couleur, de leur texture et de leur consistance y sont associés :

- Matériau brun sombre à brun très pâle, de texture sableuse à argileuse, des horizons A, AB et B 1,

- matériau nodulaire, rouge brun, brun rouge et ocre rouille, à texture plus ou moins masquée, à répartition irrégulière des quartz, à cortex sombre ou décoloré, cimenté ou friable, en continuité avec les taches blanchâtres de l'horizon B 3,

- matériau grenu, emplissant les agrotubules, hétérogène, constitué de micronodules de couleurs diverses, de grains de quartz et d'argilanes.

C'est l'association et la transformation de ces matériaux (décoloration périphérique, taches, revêtements) qui donne son aspect particulier de pseudogley à l'horizon B 3.

Il apparaît cependant qu'entre la morphologie de ce dernier et celle de l'horizon B 3 de sol rouge, seulement marqué par quelques zonations blanchâtres, il n'existe aucune solution de continuité.

d) Variations latérales à partir du sol beige typique, en direction des sols beiges hydromorphes.

Poursuivant en direction du centre du plateau et des petits thalwegs qui collectent les eaux superficielles, on observe une accentuation des caractères d'hydromorphie, déjà manifestés dans l'horizon B 3 du profil de sol beige typique, mais qui deviennent ici encore plus apparents et s'étendent à des niveaux plus élevés dans le profil.

- Modification de la couleur.

Elle consiste essentiellement :

- en un éclaircissement et une homogénéisation de la teinte de l'horizon humifère, d'un brun gris uniforme jusqu'à 30 cm de profondeur,
- en un éclaircissement de l'horizon AB, brun à brun très pâle (7, 5 YR 5/4 à 6/4) atteignant 55 cm,
- en une évolution vers des colorations plus jaunes dans l'horizon B 1 (7, 5 YR 6/4 à 7/4) où se développent largement des taches diffuses ocres et grises,
- enfin en une tendance à l'éclaircissement encore plus poussé dans l'horizon B 3 bariolé.

- Modification de la texture.

Elle est surtout marquée par le développement d'une transition nette, à 55 cm de profondeur, entre l'horizon AB argilo-sableux et l'horizon B 1 franchement argileux.

- Modification de la structure.

On note surtout le caractère massif et légèrement lité de l'ensemble du profil ainsi que l'amenuisement des fentes de retrait.
On remarque aussi l'importance relative plus grande, particulièrement au sommet de l'horizon B 1, d'une porosité large constituée de galeries contenant de nombreux débris organiques, très exploités par les termites, qui semblent correspondre au tracé d'anciennes racines d'arbres.

- Modification de l'état et de la disposition des formes nodulaires et des taches dans l'horizon B 2.

Leur limite supérieure devient nette mais largement ondulée dans le profil (entre 100 et 150 cm).
Les "concrétions" sont brunes, allongées verticalement ; elles présentent des contours très nets et un cortex noir irrégulièrement développé ; elles sont surtout abondantes de 150 à 180 cm.
Les taches se développent dans le matériau nodulaire et dans le fond matriciel ; elles présentent une grande diversité de teintes : brunes, ocres et noires entre 100 et 200 cm, à dominance blanche et jaunâtre plus en profondeur.

Dans l'ensemble on relève donc une accentuation des caractères d'hydromorphie dans un profil pédologique qui garde la même organisation générale que celle du sol beige typique.

Le fait que ces caractères d'hydromorphie apparaissent et se développent progressivement en différents niveaux du profil suggère qu'il s'agit d'une hydromorphie secondaire, induite par une première différenciation du profil en horizons pédologiques, conformément à l'hypothèse proposée par MAIGNIEN (1961).

e) Conclusion.

Les sols beiges étudiés sont en premier lieu caractérisés par un type de différenciation du profil en horizons pédologiques A, AB et B 1, marqués par des variations de la couleur, de la texture et de la structure et séparés par des limites distinctes.

Cette différenciation se manifeste d'abord au sein des matériaux rougeâtres, proches de ceux du sol de transition, elle s'accentue à mesure que se généralisent les colorations brunes, tandis que seules restent rouge (nuancé de brun, d'ocre rouille ou de rose) les enclaves correspondant aux concrétions et formes nodulaires.

Les caractères d'hydromorphie qui apparaissent et se développent progressivement en plusieurs niveaux du profil semblent être une conséquence de cette différenciation et sont donc d'origine secondaire.

B - COMPARAISON AVEC LES SOLS CULTIVES EN FONCTION DE L'ANCIENNETE DE LEUR MISE EN CULTURE.

Ayant examiné les modifications morphologiques liées à la distribution des sols dans le paysage là où la forêt a été maintenue, nous constatons qu'il en est d'autres, parfois aussi apparentes, qui semblent être plus dépendantes de l'intervention humaine, et en particulier du défrichement.

1/ - Modification du sol rouge consécutive à la déforestation.

A partir du sol rouge maintenu sous végétation forestière, on observe les variations suivantes dans les sols mis en culture :

- Modification de la couleur.

Etudiant les sols rouges les plus anciennement cultivés (depuis près de un siècle selon la tradition et selon l'enquête de SIBAND, 1970) dont l'environnement témoigne qu'ils étaient bien, à l'origine, des sols rouges typiques, on est conduit à constater que leurs colorations sont actuellement diverses :

1) Certains d'entre eux (1er type) ne diffèrent des sols maintenus sous forêt que par un éclaircissement de l'ensemble du profil (les couleurs restant cependant franchement rouges) et par une évolution vers des nuances plus jaunes limitée à l'horizon humifère (5 YR 5/6 au lieu de 2, 5 YR 3/4). Dans les horizons plus profonds, on relève sur le code

MUNSELL un décalage des valeurs ("values") tandis que les nuances ("Chroma") restent identiques (AB et B 2) ou voisines (B 1) (tableau 5-6). Ces sols rouges "éclaircis" par une influence anthropique, s'observent, entre autre, sur tous les emplacements de villages très anciens, parfois abandonnés, situés en haut de pente, sur les reliefs convexes en bordure des vallées, conditions particulièrement favorables au drainage.

2) D'autres (2me type) s'en distinguent par une évolution de la couleur qui atteint les horizons plus profonds : en particulier B 1 qui, non seulement s'éclaircit (2, 5 YR 6/8), mais encore se nuance de jaune (5 YR 5/6) et B 2 qui devient rouge clair, hétérogène, marqué par la présence de formes nodulaires ocre rouge et rouge et parfois de ponctuations blanches.

Les colorations observées dans ces profils sont voisines de celles relevées dans les sols "de transition". Mais, tandis que ces derniers étaient limités à une frange, marquant le passage entre les sols rouges (sur les reliefs à profil convexe) et les sols beiges (qui leur font suite vers le centre du plateau), ceux-ci, résultant des effets d'une action anthropique, couvrent des surfaces plus grandes et s'étendent à des situations topographiques plus diversifiées (toujours caractérisées cependant par des pentes faibles). Leur extension est particulièrement spectaculaire à Séfa, sur le périmètre de la S. O. D. A. I. C. A. où, selon SEGUY (1969), les sols rouges homogènes décrits par FAUCK en 1952 semblent avoir, pour la plupart, évolué (en une période de 17 ans seulement) vers des sols rouges caractérisés par une forte hétérogénéité de la couleur au niveau de l'horizon B 2. Il s'agit dans tous les cas de sols situés en position de pente faible ou nulle.

Deux modifications différentes de la coloration manifestent ainsi les transformations du sol sous l'effet de la mise en culture :

- La première est telle que, près d'un siècle après le défrichement, les sols présentent encore les mêmes nuances (mis à part l'horizon humifère) que celles du sol initial, sous couvert forestier. Seul un éclaircissement indique alors l'effet de l'action anthropique.

- La deuxième correspond à une évolution plus rapide puisque, moins de 20 ans après leur mise en culture, la plupart des sols de Séfa en présentent les indices observés aussi bien dans les horizons

Tableau 5-6.

EVOLUTION DE LA COULEUR DES SOLS ROUGES APRES LEUR MISE EN CULTURE

PROFILS / HORIZONS	SOUS FORET	SOUS CULTURES (OU JACHERES)	
		Sites de villages anciens Haut de pente en bordure de vallée	Exemple de Séfa - zone de pente faible (Plateau)
A	Brun rouge sombre (2, 5 YR 3/4)	Rouge jaune brun (5 YR 5/6)	Brun gris (10 YR 4/2)
A B	Rouge sombre (2, 5 YR 3/6)	Rouge clair (2, 5 YR 6/6)	Jaune rouge brun (5 YR 6/6)
B 1	Rouge (2, 5 YR 4/6)	Rouge (2, 5 YR 5/8)	Rouge jaune brun (5 YR 5/6)
B 2	Rouge (10 R 3/6)	Rouge (20 R 5/6)	Rouge clair (2, 5 YR 6/8) + Formes nod. ocre rouge et rouges.

A, AB et B 1 (nuancés de jaune) que dans les horizons plus profonds (éclaircis et marqués par le développement d'une hétérogénéité).

Les possibilités de drainage externe, dépendantes de la position topographique, exerceraient une action déterminante sur ces modifications, les orientant vers le deuxième type là où elles sont limitées (pente faible et éloignement des axes de drainage), vers le premier à proximité des vallées.

La relation avec les effets de la culture mécanisée serait secondaire (celle-ci étant toutefois généralement limitée aux pentes très faibles) puisqu'on observe des évolutions du deuxième type sous culture traditionnelle.

- Modificationsde la texture.

Elles semblent être étroitement liées à celles de la couleur.

Il y a lieu de distinguer d'abord les atterrissements lités, accumulés par l'érosion, qui forment des dépôts lenticulaires dans les zones déprimées formées par d'anciennes ravines ou sillons. Jamais observés sous couvert forestier conservé, ceux-ci peuvent prendre, sous culture, un développement important, atteignant localement 35 cm ou plus. Composés principalement de sableshétérométriqués, triés et stratifiés, de couleur beige rosé, leur texture est sableuse, parfois à peine argileuse. Ils peuvent être superposés à des profils de sols très différents, souvent tronqués et présentent avec eux des limites nettes. Leur présence témoigne de l'importance des écoulements superficiels dans les zones cultivées, même sur des sols apparemment perméables en surface.

La partie des sols qui ne présente pas d'indices de remaniements est caractérisée par des profils texturaux différents selon qu'il s'agit de sols rouges "éclaircis" (1er type) ou de sols dont la partie supérieure du profil est nuancée de jaune tandis que l'horizon B 2 présente une coloration rouge clair hétérogène (2e type).

- Dans le premier cas, le profil présente, dans son ensemble, un caractère sableux nettement plus marqué que celui des sols maintenus sous couvert forestier. Par des transitions à peine perceptibles, on passe d'un horizon A franchement sableux, à un horizon AB à

peine argileux puis à un B 1 sablo-argileux à argilo-sableux. Plus en profondeur (à partir de 95 cm), l'horizon B donne d'abord une impression de texture sableuse et ne révèle son caractère argileux qu'après un temps de malaxage.

- Dans le deuxième cas, les textures sont, à l'inverse, plus argileuses que celle du sol rouge typique et leurs variations verticales apparaissent nettement, à différents niveaux :
A sableux à sablo-argileux - AB sablo-argileux - B 1 argilo-sableux à argileux - B 2 caractérisé par une texture complexe (formes nodulaires sablo-limoneuses, matrice argilo-sableuse).

Il semble donc que les effets exercés par la mise en culture sur le profil textural, en relation avec l'évolution de la coloration des sols, peuvent être diamétralement opposés :

- atténuation des contrastes et développement du caractère sableux (sols rouges "éclaircis"),

- ou évolution vers un profil plus nettement différencié, présentant un horizon B 1 franchement argileux (sols à horizons A, AB et B 1 nuancés de jaune et B 2 rouge clair hétérogène).

On remarque :

1) que la modification du profil textural sous l'effet de la mise en culture dans les sols du 2e type est comparable à celle qui a été observée dans les sols de "transition" (sous couvert forestier conservé)

2) que ce mode d'évolution se traduit par une accentuation du caractère argileux au niveau des horizons AB et surtout B1. Or celle-ci ne saurait être attribuée à une argilification des minéraux altérables (pratiquement absents du matériau), ni au seul mécanisme d'illuviation, compte tenu du fait que l'on n'observe pas de développement correlatif d'horizons éluviés.

Le problème de l'origine de cette évolution vers une texture plus argileuse est donc posé ; il ne pourra lui être apporté de réponse que par une analyse plus développée.

- Modification de la structure.

Là encore, deux orientations possibles, sont en relation avec les modifications de la couleur (et de la texture) :

- Dans les sols rouges cultivés du 1er type, l'évolution (par rapport au sol rouge typique) est surtout marquée par l'accentuation de la tendance particulaire à massive sur l'ensemble du profil : seul l'horizon B 1 est caractérisé par l'existence de fentes, par des débits polyédriques et par une cohésion moyenne à forte ; les matériaux des autres horizons se défont en éléments émoussés ou s'écrasent sous la pression des doigts. On remarque, sur l'ensemble du profil, le développement d'une porosité importante d'origine biologique : nids et galeries dans l'horizon AB, pédotubules très abondants dans les horizons B 1 et B 2.

- Dans les sols rouges cultivés du 2e type, la structure particulaire à grumeleuse est limitée à l'horizon travaillé ; immédiatement en-dessous, par une transition nette, on passe à l'horizon AB, à structure massive, se débitant en éclats horizontaux, très durs à briser à la main à l'état sec mais perdant toute cohésion à l'état humide. Au niveau de l'horizon B 1 se différencie progressivement une structure polyédrique grossière puis moyenne, tandis qu'apparaissent et s'élargissent les fentes de retrait et que se développe une porosité biologique importante (nids et galeries).

L'horizon B 2 reste meuble et frais, sa structure, polyédrique assez fine, est fortement influencée par la présence de formes nodulaires rouges (qui par écrasement se défont en micropolyèdres) et de pédotubules (emplis d'éléments finement grenus et polyédriques).

- Modifications de l'état des formes nodulaires.

Dans le sol rouge typique, sous végétation forestière, nous avions noté la présence de quelques formes nodulaires, à peine cimentées, de couleur rouge (10 R 3/6) très peu contrastées par rapport à la matrice, petites et rares de 0,8 à 1,4 m, plus abondantes vers 1,6 m.

Dans le sol rouge cultivé du 1er type, nous n'en trouvons aucune aux mêmes profondeurs.

Dans le sol rouge cultivé du 2e type, à l'inverse, des formes nodulaires ocre rouge et rouges, présentant un contraste net avec le fond matriciel de l'horizon B 2, apparaissent à 80-90 cm et se développent plus en profondeur. Plus cimentées que celles du sol rouge typique, elles s'écrasent cependant sous la pression des doigts, de même que celles du sol de "transition" dont elles ont l'aspect, l'organisation et la consistance.

Le problème posé ici est celui de la génèse de ces formes nodulaires :

Existaient-elles sous une forme discrète dans les sols rouges au moment de leur mise en culture (elles se seraient alors estompées dans les sols rouges éclaircis, tandis qu'elles se différenciaient et devenaient plus apparentes, par accroissement du contraste avec le fond matriciel, dans le sol rouge jaune ?)

Ou bien se sont-elles formées de toute pièce sous l'effet des conditions pédogénétiques introduites par la mise en culture ?

Le fait qu'elles soient plus abondantes dans de nombreux sols cultivés de Séfa qu'elles ne le sont (sous forme discrète) dans les sols rouges avoisinants plaide en faveur de la deuxième hypothèse. Par ailleurs, leur apparition à des niveaux toujours assez comparables (de 80 à 120 cm) révèle qu'elles sont bien en relation avec le profil pédologique (et non avec les caractéristiques du matériau originel). Elles seraient donc bien le résultat de l'évolution pédologique actuelle.

2/ - Modification du sol beige consécutive à la déforestation

- Aucun changement notable n'est à signaler en ce qui concerne la coloration et la texture (mis à part ceux qui peuvent résulter d'une éventuelle troncature du profil, mettant à jour les horizons AB, B 1 ou B 2.)

- L'évolution de la structure correspond généralement à un renforcement du caractère massif, de la compacité et de la cohésion des horizons A et AB.

- Enfin, l'état et la répartition des formes nodulaires reste sensiblement identique à celui observé sous forêt.

3/ - Conclusions.

Appliquée aux deux sols différents, la même perturbation du pédoclimat provoquée par le défrichement occasionne donc dans le sol rouge une transformation importante des caractères morphologiques, tandis que; dans le beige, ses effets sont imperceptibles ou très limités.

De l'ensemble des données relatives à l'étude comparative de la morphologie des sols cultivés nous retiendrons quelques indications importantes :

1) Le fait que les profils de sols rouges soient beaucoup plus profondément, que ceux des sols beiges, modifiés par la mise en culture, semble indiquer qu'ils sont, moins que ces derniers, en équilibre avec les conditions d'évolution réalisées sur les plateaux de moyenne Casamance après défrichement. Une telle opinion avait déjà été exprimée par MAIGNIEN (1961).

2) Les deux orientations possibles de la transformation morphologique de ces sols rouges (éclaircissement - développement du caractère sableux - ou jaunissement et accentuation des contrastes de couleur et de texture) pourraient être expliquées par les caractères intrinsèques des sols avant leur mise en culture ou encore par leurs conditions d'évolution différentes dépendantes de leur position dans le paysage qui détermine en particulier les possibilités de drainage. Les observations faites incitent à opter pour la deuxième hypothèse : à des conditions d'écoulement des eaux limitées sur l'ensemble des plateaux correspond la dominance des évolutions du deuxième type (jaunissement et accentuation des contrastes de texture et de couleur), celles du premier étant limitées au rebord des vallées.

3) Le temps requis pour la transformation morphologique de ces sols à partir du moment de leur mise en culture est différent dans l'un et l'autre cas : si une longue période (près d'un siècle) semble être nécessaire pour provoquer un éclaircissement notable, il apparaît cependant que les caractères de différenciation particuliers aux sols rouges cultivés de Séfa (2e type) se sont développés en moins de 20 ans (SEGUY, 1969).

4) L'évolution du deuxième type est marquée par des transformations morphologiques différentes localisées dans les horizons superficiels et profonds du profil pédologique :

- jaunissement et développement d'une structure massive, d'une compacité élevée et d'une cohésion forte à l'état sec dans les horizons AB (et à un moindre degré B 1),

- différenciation de formes nodulaires dans l'ho-

rizon B 2 éclairci.

Or, SEGUY, après avoir examiné de très nombreux sols rouges cultivés, affirme que ces deux groupes de caractères morphologiques sont, dans ces conditions,"indissociables". On est conduit alors à les considérer; soit comme étant les résultantes indépendantes d'un même ensemble de processus évolutifs, soit plutôt à penser que l'apparition des uns commande celle des autres et que cet enchaînement pourrait alors dépasser le cadre d'une évolution purement verticale, et offrir des possibilités de propagation de proche en proche.

C - CONCLUSIONS DE L'ETUDE MORPHOLOGIQUE.

Les observations faites sur le terrain révèlent que les profils pédologiques sont ici ordonnés dans l'espace (à l'échelle du paysage) et dans le temps (en fonction de l'ancienneté du défrichement).

Elles mettent particulièrement en évidence :

- Au sein de la toposéquence sous forêt :

. deux grands ensembles nettement caractérisés du point de vue morphologique :

+ sols rouges, homogènes, poreux et friables,

+ sols beiges, à profils différenciés en horizons pédologiques, dont certains concrétionnés.

. entre les deux, des variations latérales limitées à une frange étroite, portant en particulier les horizons A, AB et B 1 (compacts) et les horizons B 2 et B 3 (nodulaires).

- Dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture

. des variations qui affectent, de façon chronologique l'ensemble de chaque parcelle après son défrichement, et qui se traduisent, dans certains cas, par le développement de caractères morphologiques comparables à ceux observés dans les sols de transition de la toposéquence (différenciation plus apparente des horizons A, AB et B 1, puis nodulation des horizons plus profonds).

Le problème posé ici est celui de la signification réelle des convergences morphologiques ainsi reconnues.

Pour la découvrir il convient d'analyser les systèmes observés, particulièrement aux niveaux où sont décelés les caractères de transition, en faisant appel aux techniques de laboratoire. Le prélèvement des échantillons destinés à cette fin a donc été guidé par les observations morphologiques. Cependant, lorsque les caractères de différenciation sont à peine visibles (dans les sols rouges), les prélèvements ont été effectués de façon systématique, à intervalle constant (10 cm), de façon à mettre en évidence les variations les plus diffuses.

Chapitre 6

CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DES SOLS

1/ - Objectifs.

Les données granulométriques expriment (plus ou moins parfaitement) la distribution dimensionnelle des "particules élémentaires" des matériaux pédologiques. Mais il faut indiquer aussitôt qu'en fonction des objectifs poursuivis, il est possible d'envisager 2 conceptions différentes :

- d'une part, le propos est d'interpréter ces données afin de reconstituer les conditions de la genèse des sols. A cette fin on établit tout d'abord une distinction entre la fraction argile ($\varnothing < 2\ \mu$) qui regroupe dans la plupart des sols l'ensemble des "minéraux secondaires" issus des processus d'altération, et les constituants plus grossiers, considérés comme résiduels (non altérés et/ou non altérables) dont les caractéristiques renseignent également sur les conditions de la mise en place, de l'évolution et de la redistribution à différentes échelles des minéraux du sol. On considérera alors essentiellement la distribution dimensionnelle des individus cristallins qui sont susceptibles d'évoluer ou d'être déplacés isolément.

- d'autre part, il est de caractériser la "texture" des sols c'est-à-dire ce qui, dans leur comportement physique dépend de l'influence propre des particules de différentes tailles qui le constituent et des interactions qui se manifestent entre elles. On considérera alors comme constituants

granulométriques toutes les particules, même complexes, dont la stabilité, dans les conditions naturelles est suffisante pour que leur influence soit perceptible. Si les appréciations tactiles, faites sur le terrain, permettent une première estimation de la texture ("field grading" selon BREWER, 1964), il convient toutefois de tenter de relier cette caractéristique aux résultats de l'analyse granulométrique afin de lui fournir des bases plus objectives et quantitatives.

2/ - Méthode utilisée.

La méthode utilisée par les laboratoires de pédologie a été mise au point et généralisée en raison de considérations relatives à sa commodité d'emploi et à un critère d'efficacité, évalué par le taux d'éléments fins qu'elle permet d'obtenir.

Elle comporte :

- une phase de destruction des ciments organiques par traitement à l'eau oxygénée "technique" (ce réactif stabilisé à pH 0, 7 par l'acide phosphorique est aussi susceptible d'exercer une action sur certains ciments minéraux),

- une phase de dispersion qui met en œuvre l'élimination des ions floculants, l'adjonction d'un produit stabilisant et l'agitation mécanique par retournements durant 4 heures. Le réactif ajouté est destiné à augmenter la charge des micelles afin de rendre maximum les forces de répulsion. On utilise ici l'hexamétaphosphate de sodium qui s'est révélé très efficace, même pour des matériaux difficilement dispersables,

- une phase de séparation et de tri des particules, par sédimentation et prélèvement à la pipette pour les fractions 0 - 2 µ (argile) et 2 - 20 u (limon) et tamisage pour celles comprises entre 50 et 2000 u. L'étude détaillée de la distribution dimensionnelle des sables (⩾ 50 à 2000 µ), séparés en 12 classes de tailles différentes par tamisage, en vue d'une interprétation statistique, nécessite le traitement de quantités importantes de terre dans des conditions comparables, puis l'élimination de l'argile et du limon par décantations successives.

3/ - Résultats.

a) Données granulométriques relatives à quelques profils représentatifs de la toposéquence de Salikenié.

Sur près de 300 analyses faites sur les sols de la toposéquence et 700 autres données disponibles relatives à d'autres sols rouges et beiges de moyenne Casamance (TOBIAS, 1965, CHAUVEL, 1968, SEGUY, 1969, FAUCK, 1972), nous avons retenu 80 résultats qui caractérisent 4 profils représentatifs (rouge, de transition et beige), situés à faible distance les uns des autres sous végétation forestière conservée (fig. 6-1).

Variations verticales des taux d'argile ($\varnothing < 2\ \mu$).

On relève certaines analogies entre les profils : les taux d'argile relativement constants et de l'ordre de 40 % dans la plus grande partie des horizons B, diminuent fortement depuis la partie supérieure de l'horizon B 1 jusqu'à la surface ; ils atteignent des valeurs voisines de 10 % dans l'horizon humifère.

Il apparaît également des différences selon les sols qui portent :

- sur les teneurs maximales d'argile dispersée : comprises entre 40 et 50 % dans le sol rouge, elles sont un peu supérieures dans le sol de transition (52 %) et sensiblement moindres dans le sol beige (35 %),

- sur les variations verticales de ces taux d'argile dans les horizons B :
maximum à peine marqué à la base de B 1 et au sommet de B 2 dans le sol rouge, dédoublé (à la base de B 1 et à la base de B 2) dans le sol de transition, nettement individualisé au milieu de l'horizon B 1 dans le sol beige,

- sur l'allure de la décroissance des taux d'argile dans la partie superficielle du profil : relativement progressive dans le sol rouge, marquée par des variations brusques (en marches d'escalier) dans le sol rouge brun, par des variations plus atténuées dans le sol de transition, par une concavité accrue de la courbe de distribution verticale de l'argile dans le sol beige.

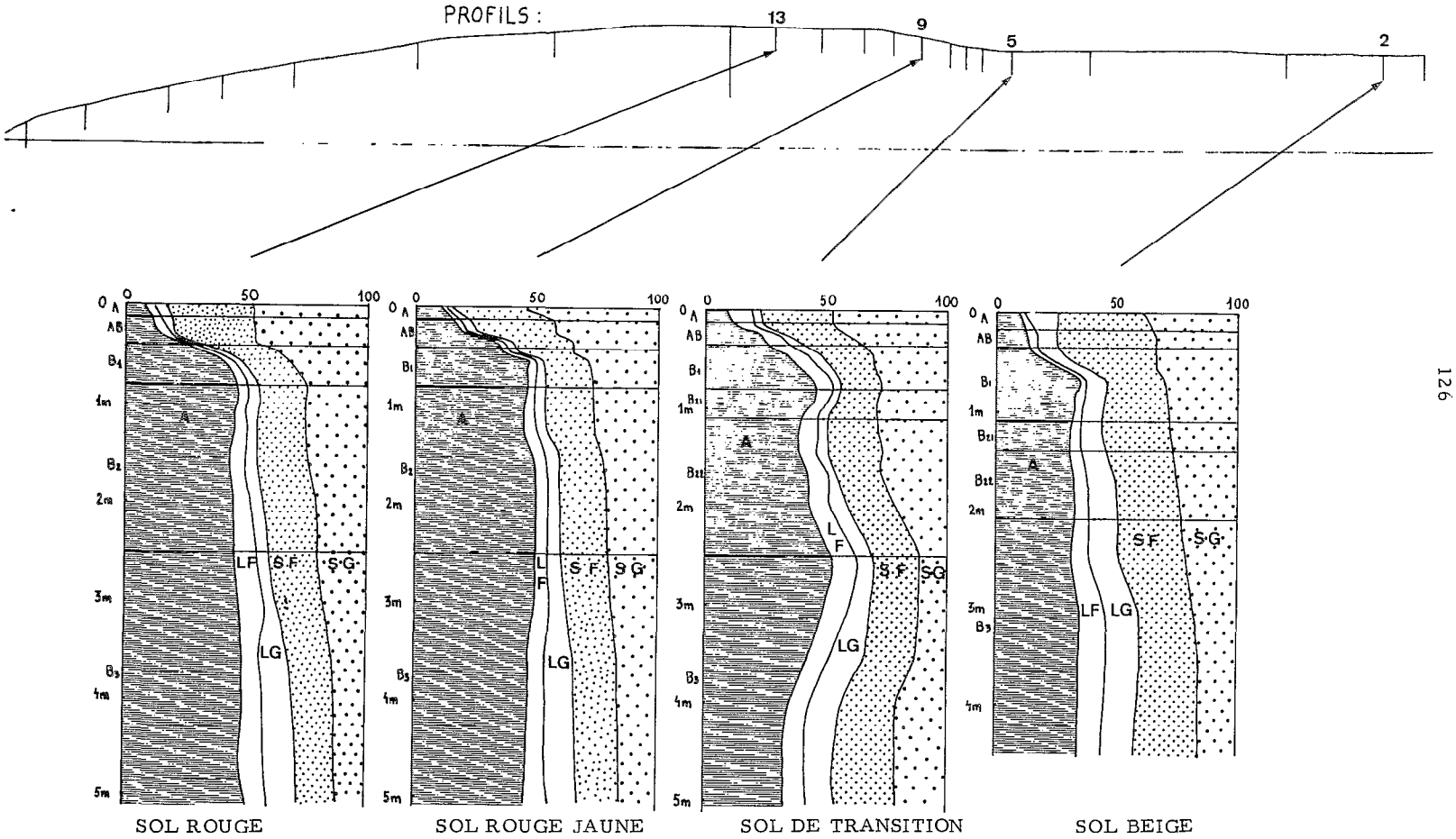


Fig. 6-1 - Granulométrie de 4 profils caractéristiques de la toposéquence de Salikenié.

Ces graphiques mettent donc en évidence une faible variation latérale au passage des sols rouges aux sols beiges. Il importe de savoir dans quelle mesure celle-ci est liée aux caractéristiques des matériaux originels.

Distributions dimensionnelles des limons et des sables.

L'examen des spectres granulométriques (fig. 6-1) nous renseigne de façon incomplète sur leurs variations, faisant seulement apparaître :

- en ce qui concerne les limons, verticalement, de bas en haut :
  + une diminution de la teneur en limons grossiers (20-50 µ) au passage de l'horizon B 3 à l'horizon B 2, particulièrement nette dans les sols rouges,
  + un accroissement de la teneur en limons fins et surtout grossiers, au niveau des horizons AB et A, surtout marqué dans le sol beige et latéralement, une augmentation de l'abondance des limons grossiers au passage du sol de transition au sol beige.
- en ce qui concerne les sables, verticalement, de bas en haut :
  + un accroissement progressif des taux de sable grossier (200 - 2000 µ) (sauf dans l'horizon B 3 du sol de transition),
  + une relative stabilité de la teneur en sable fin (50-200 µ) (sauf au sommet du profil de sol beige, marqué par une augmentation sensible de leur abondance).

Ces données globales ne mettent pas en évidence les variations des classes granulométriques les unes par rapport aux autres. C'est pour les compléter qu'ont été calculés les rapports entre les deux fractions les plus représentées : sable fin/sable grossier (fig. 6-2).

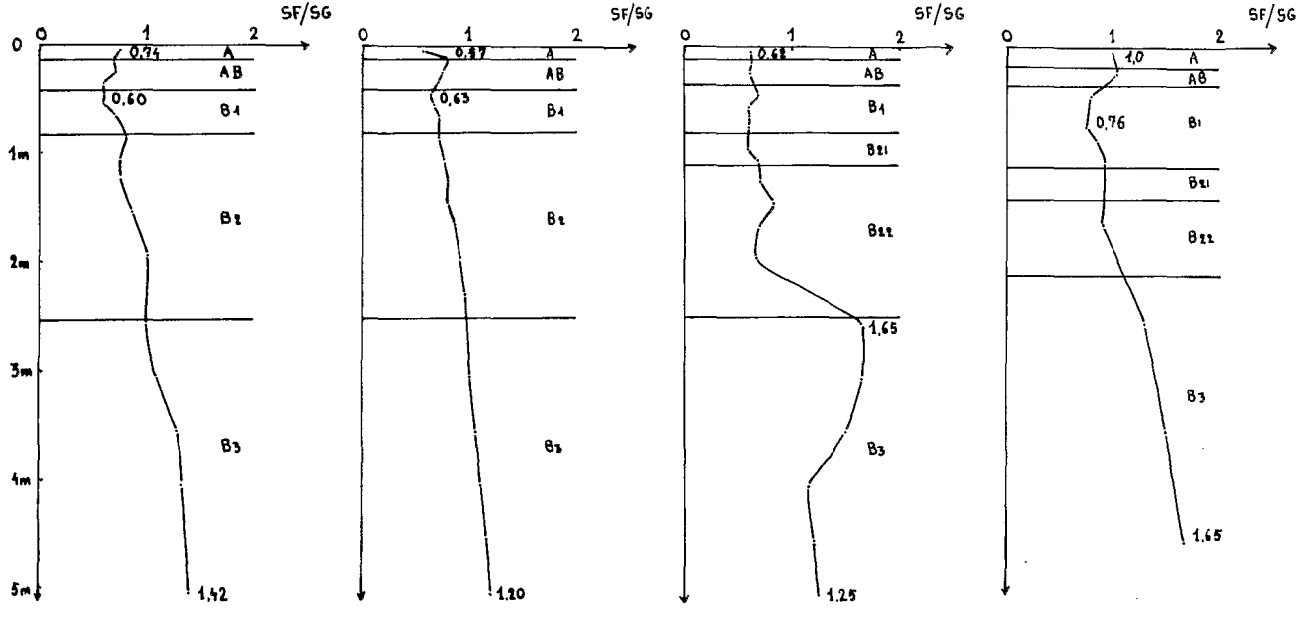


Fig. 6-2 - Rapports sable fin/sable grossier (toposéquence de Salikenié).

On constate que ce rapport est :

- dans les sols rouges, régulièrement décroissant de bas en haut jusqu'à l'horizon AB,

- dans le sol de transition, marqué par un maximum important au niveau des horizons B 3 et B 2,

- dans le sol beige, décroissant jusqu'au milieu de l'horizon B 1, puis sensiblement plus élevé dans les horizons AB et A.

Les granulométries détaillées de 24 échantillons de sables extraits du sol rouge et du sol beige ont donné lieu à une étude comparative entreprise sur les refus d'une série de 13 tamis A. F. N. O. R. allant de 50 à 2000 µ. Les pourcentages cumulés des pesées ont servi à dresser une série de graphiques pour faciliter leur interprétation : courbes cumulatives à abscisses (tailles des grains) logarithmiques et ordonnées (pourcentages cumulés) gaussiennes (fig. 6-3).

De cette représentation, il ressort nettement que les niveaux correspondants à la base de l'horizon B 1 (compris entre 80 et 110 centimètres de profondeur dans les deux sols) présentent des distributions de sable très voisines, gaussiennes de 62 à 400 µ ; leur valeur médiane est, dans l'un et l'autre cas voisine de 160 µ, tandis que leurs indices d'hétérométrie (Q d ϕ de KRUMBEIN 1938 et He de CAILLEUX 1959 confondus ici) s'élèvent à 0, 57 dans le sol rouge et à 0, 58 dans le beige (1).

Remarque : la plus grande partie des variations verticales de la granulométrie étant localisée dans les horizons B 2, B 1, AB et A, c'est dans cette partie du profil, la plus directement soumise aux conditions actuelles de la pédogenèse, qu'il convient d'entreprendre les études plus détaillées.

---

(1) Ces indices croissent progressivement avec la profondeur, mais de façons un peu différentes, dans l'un et l'autre sol. On relève également un léger déficit de sables fins inférieurs à 62 µ par rapport à la distribution normale, ainsi qu'un appauvrissement des classes comprises entre 500 et 1000 µ dans le sol rouge.

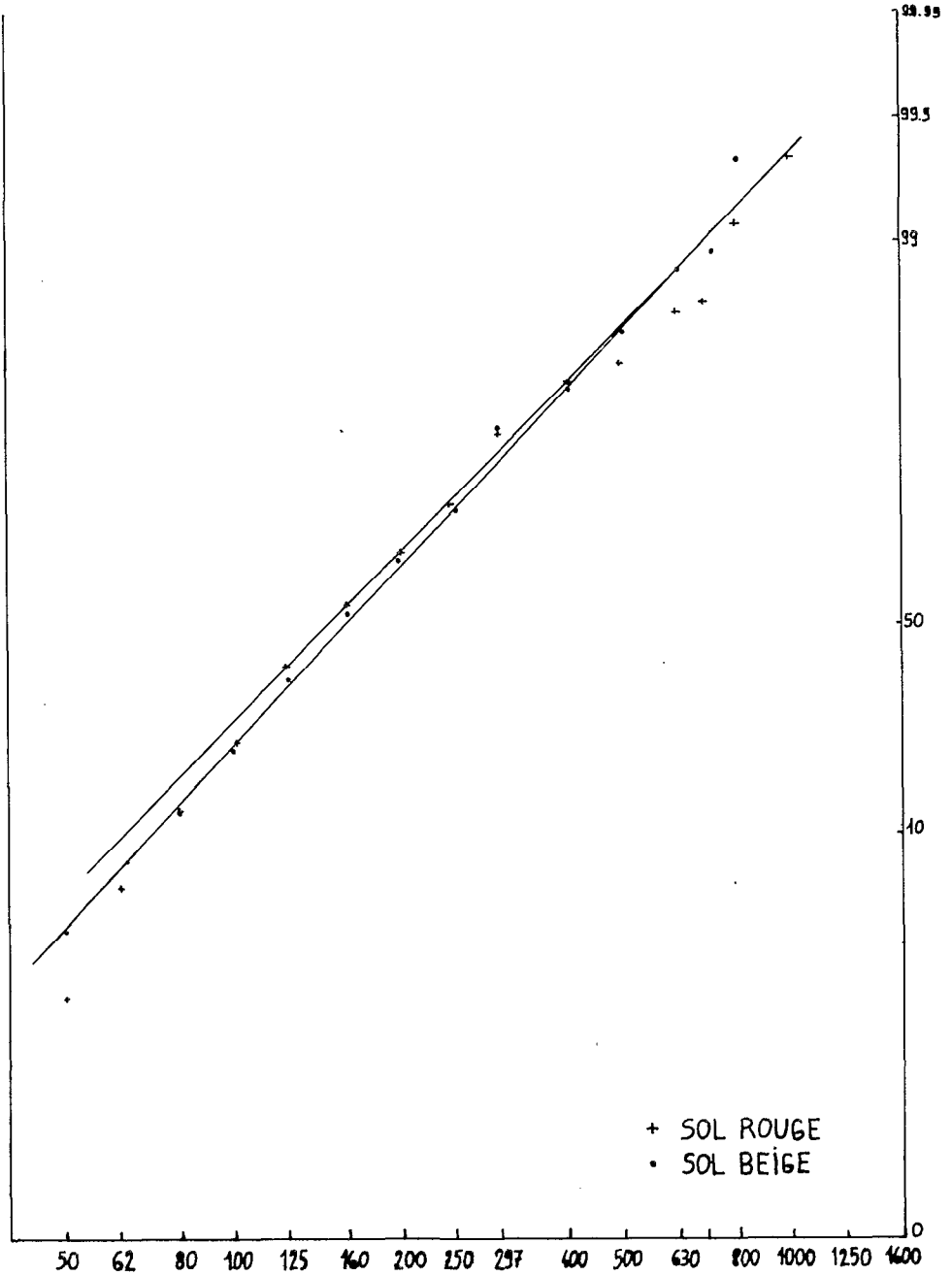
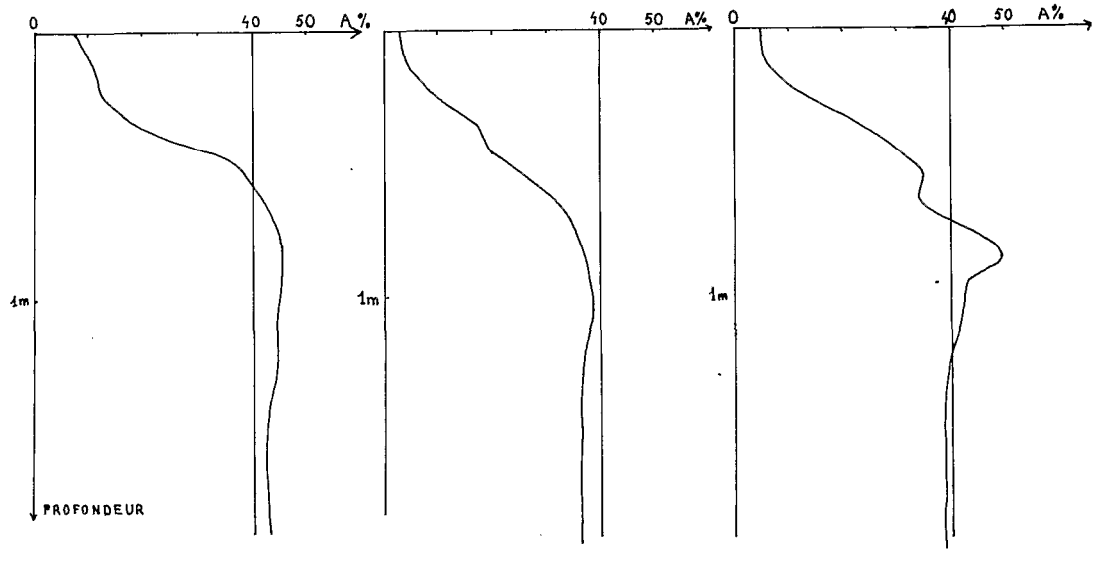


Fig. 6-3 - Courbes cumulatives à abscisses (taille des grains) logarithmiqueset ordonnées(pourcentages cumulés) gaussiennes.

b) Données granulométriques relatives à quelques profils de la séquence de sols rouges cultivés.

Variations verticales des taux d'argile ($\varphi < 2\ \mu$) (fig. 6-4).



SOL ROUGE SOUS FORET

SOL ROUGE CULTIVE "ECLAIRCI"

SOL ROUGE CULTIVE A CONTRASTES DE COULEURS.

Fig. 6-4 - Variations verticales des taux d'argile dans les sols cultivés.

Les sols cultivés depuis près d'un siècle, présentent des caractéristiques différentes, à ce point de vue, selon leur morphologie : (cf. chap. 5)

- lorsqu'il s'agit de sols éclaircis, ces variations ne semblent différer de celles mises en évidence dans les sols maintenus sous forêt que par l'approfondissement et la diminution de la valeur relative du maximum d'argile et par le développement d'une variation brusque (en marche d'escalier) à la base de l'horizon AB,

- lorsque ces sols présentent des contrastes de couleur, un maximum accentué du taux d'argile est décelé à la base de l'horizon B 1, tandis que la décroissance, depuis ce niveau

jusqu'à la surface, apparaît alors marquée par des ressauts successifs.

Dans tous les cas, la teneur en argile est sensiblement diminuée dans l'horizon A (de 30 à 60 %).

Distribution dimensionnelle des limons et des sables.

Aucune variation n'est perceptible à ce sujet, dans les sols rouges, qui soit dépendante des effets de la mise en culture, mis à part celle limitée à des atterrissements lités, accumulés localement par l'érosion, formant des dépôts lenticulaires dans les zones déprimées (le rapport sable fin/sable grossier y atteint des valeurs élevées, parfois supérieures à 1, 3).

4/ - Identification des fractions séparées par l'analyse granulométrique.

L'interprétation des données granulométriques suppose la connaissance de la nature des constituants regroupés dans les fractions. Celle-ci est ici déduite de l'observation et des résultats de l'analyse thermogravimétrique.

Observation à la loupe binoculaire.

Les sables et limons grossiers présentent des aspects différents selon les sols dont ils sont extraits.

- Les sables du sol rouge apparaissent ainsi constitués :
  + principalement par des grains de quartz, assez propres, blancs, parfois arrondis et souvent fissurés et corrodés, localement teintés, soit à leur périphérie par des placages rouge jaune, soit dans leur masse par des incrustations et des veines rose violacé qui apparaissent en transparence.
  + en quantités faibles et variables selon les horizons, par des particules complexes opaques, de couleur rouge (identique à celle du sol entier), de forme ovale, réniforme ou sphérique, mamelonnée, contenant de petits grains de

quartz anguleux inclus dans leur masse, de dimensions variables (50 à 200 μ), se défaisant en petits grains de diamètre compris entre 10 et 50 μ (comme les drupes d'une framboise).

. Assez abondantes dans l'horizon B 3, ces particules complexes sont alors associées à des fragments plus grossiers, à arêtes vives.

. Plus rares dans l'horizon B 2, elles y présentent des dimensions et des formes plus régulières.

. Peu représentées dans les horizons B 1, AB et A, elles y sont généralement de petites tailles ($\phi < 100\ \mu$).

- Les limons grossiers issus du sol rouge (et plus particulièrement ceux extraits de l'horizon B 3) contiennent de grandes quantités de ces particules complexes qui leur confèrent une couleur rouge caractéristique.

- Les sables extraits du sol de transition sont constitués:
  + de grains de quartz assez semblables à ceux du sol rouge (dominants, quel que soit l'horizon),
  + de fragments grossiers, opaques, rouge sombre, à arêtes vives, à porosité tubulaire (dans les horizons B 3 et B 2),
  + de particules complexes rouges, analogues à celles précédemment décrites dans le sol rouge (surtout dans les horizons B 3, B 22 et B 21).

- Les limons grossiers issus du sol de transition sont encore abondamment pourvus de particules complexes rouges.

- Les sables extraits du sol beige sont constitués :
  + de grains de quartz arrondis ou corrodés, fissurés, rarement transparents, le plus souvent recouverts d'une pellicule ferrugineuse brune

et localement, de placages brun rouge sombre. Les plus propres laissent entrevoir des incrustations et veines rose violacé, identiques à celles décrites dans les sables du sol rouge,

+ de fragments grossiers opaques, à arêtes vives, hétérogènes de couleurs : brun rouge, ocre rouge, brun sombre et noir, différentes de celles du sol entier, seulement représentés dans les sables issus des horizons B 3, B 22 et B 21.

- Les limons grossiers issus du même sol, contiennent encore quelques particules complexes rouge sombre (particulièrement ceux extraits des horizons B 3, B 22 et B 21) mais sont en majeure partie constitués de quartz finement pulvérisé (qui leur confèrent une couleur blanche).

En conclusion de cette brève étude descriptive, il apparaît :

- que les sables et limons grossiers extraits après dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium, des sols rouges et beiges ont très souvent des compositions complexes, étant formés à la fois de grains de quartz (dominants) et de particules complexes opaques (ou "pseudoparticules"). Ces dernières se raréfient toutefois dans les sables extraits des horizons B 1, AB et A constituant l'apexsol,

- que l'état de la surface des grains de quartz diffère selon les sols (assez propres et blancs dans les sols rouges, recouverts d'une pellicule ferrugineuse brune dans les beiges) révélant des conditions d'évolution différentes en ce qui concerne la dynamique du fer.

Résultats de l'analyse thermogravimétrique.

Ils complètent les indications fournies par l'observation et permettent d'apprécier qualitativement et quantitativement la répartition des constituants minéraux des sols dans les fractions granulométriques séparées, fournissant ainsi les bases nécessaires à la reconstitution de la "granulométrie virtuelle" (BLOT et PEDRO, 1967).

Ces données révèlent que les particules complexes (ou "pseudo-particules") observées à la loupe binoculaire dans les limons et les sables correspondent, en fait, à un mélange de kaolinite et de quartz, associés à des sesquioxydes libres qui sont représentés principalement par des hydrates ferriques amorphes et par un peu d'hématite.

Dans les fractions extraites du sol rouge (après dispersion à l'hexamétaphosphate), ces constituants sont peu représentés dans les sables (dont la granulométrie réelle serait ainsi approchée) mais le sont davantage dans les limons.

Dans celles issues du sol de transition et du sol beige, ils sont, à l'inverse, plus abondants dans les sables que dans les limons (ce qui met en cause la signification même des études granulométriques pratiquées sur ces sols).

Dans tous les sols étudiés, les teneurs en kaolinite et en hydrates ferriques des sables diminuent fortement de bas en haut à la base de l'apexsol * (au passage de l'horizon B 2 à l'horizon B 1, soit entre 1,10 m et 0,8 m) et s'annulent presque dans les horizons superficiels.

Ce résultat révèle la modification verticale de l'état d'association et de cimentation de la kaolinite et des hydrates ferriques à ce niveau (qu'il conviendra d'étudier plus en détail). Il confirme aussi que les sables issus des échantillons prélevés à la base de l'horizon B 1 sont bien presqu'exclusivement composés de particules simples de quartz.

5/ - Interprétation des résultats.

Elle est faite ici en fonction des deux objectifs poursuivis :

a) Indications sur les conditions de la genèse des sols.

Elles n'ont ici qu'une signification limitée puisqu'elles n'expri-

---

* C'est précisément à ce niveau que les distributions dimensionnelles des sables de sol rouge et de sol beige sont les plus voisines (cf. p. 129)

ment que localement et de façon imparfaite la distribution dimensionnelle des individus cristallins qui sont susceptibles d'évoluer ou d'être déplacés isolément, qu'il s'agisse de minéraux primaires maintenus à partir de la roche mère (essentiellement des quartz) ou de minéraux secondaires plus aptes à être mobilisés et redistribués dans le profil sous forme d'argile.

Quelques faits se dégagent toutefois de ces données.

- Les distributions dimensionnelles des sables extraits des échantillons prélevés à la base de l'apexsol, très voisines d'une extrémité à l'autre de la toposéquence de Salikenié, révèlent que les sols rouges et beiges, différents par leur morphologie, sont ici formés à partir d'un même matériau originel (ou de matériaux originels très comparables). Leurs caractéristiques distinctives sont donc, dans ce cas, principalement dépendantes des conditions de la pédogenèse (et non des héritages de la roche mère).

- Les variations progressives des indices d'hétérométrie et des rapports sable fin/sable grossier, au-dessous de ce niveau ne sont pas directement interprétables (en présence de "pseudoparticules") ; elles expriment cependant une relation de continuité entre l'apexsol et les horizons sous-jacents, et semblent mettre en évidence une décroissance régulière de l'abondance relative des sables fins de bas en haut du profil.

- Les variations verticales brusques du rapport sable fin/sable grossier décelées dans le sol de transition expriment une particularité de ce sol dont il conviendra de déterminer l'origine (présence de pseudoparticules et/ou fragmentation des quartz).

b) Relation avec les appréciations et observations faites sur le terrain.

Cette texture est évaluée directement, de façon plus ou moins précise, sur le terrain, après humectation et manipulation du sol ("field grading" BREWER, 1964)

Appréciation tactile.

Les taux d'argile déterminés par l'analyse et les classements texturaux qui en sont déduits ont été mis en regard des appréciations texturales faites sur le terrain dans le tableau 6-1 et la figure 6-5.

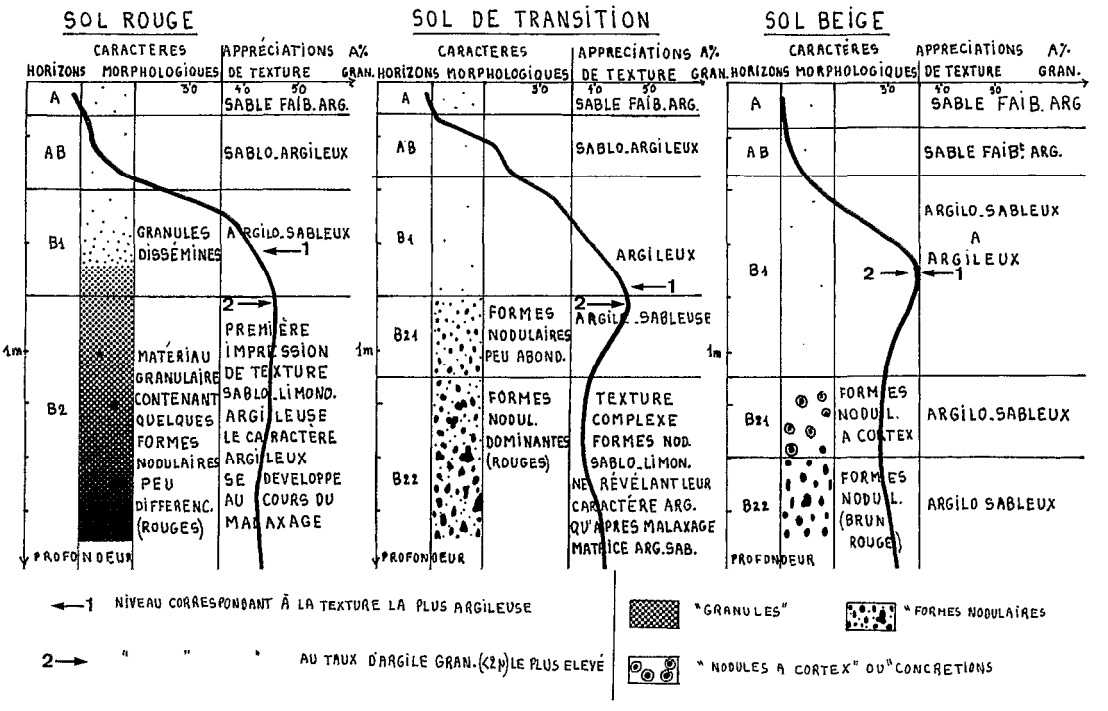


Fig. 6-5 - Variations verticales de l'argile granulométrique (méthode "classique") et de la texture (appréciée sur le terrain) en relation avec la distribution des "granules", "formes nodulaires" et "concrétions" dans le profil. (Sols sous végétation forestière).

Il apparaît immédiatement une divergence entre ces deux groupes de données :

- généralisée à l'ensemble du profil dans le sol rouge particulièrement accentuée dans l'horizon B 2 dont le caractère argileux n'est révélé que progressivement par malaxage (responsable d'un décalage appréciable entre les niveaux correspondants au maximum d'argile granulométrique et à la texture la plus argileuse,

- atténuée dans les horizons A, AB et B 1 du sol de transition mais encore très marquée dans ses horizons B 21 et B 22 (responsable d'un faible décalage entre le niveau correspondant à un maximum accentué d'argile granulométrique, et celui caractérisé par la texture la plus argileuse qui lui est immédiatement superposé),

- très réduite et limitée aux horizons B 21 et B 22 du sol beige (dans lequel l'impression de texture est très proche du classement déduit des données granulométriques).

Tableau 6-1.

RELATION ENTRE LES TAUX D'ARGILE GRANULOMETRIQUE ET LES APPRECIATIONS TACTILES DE LA TEXTURE.

Sols	Horizons	Profondeurs	A % granulométrique et classement textural	A % estimé et appréciation de la texture
ROUGE	A	0 - 12 cm	9 - SABLO-ARGILEUX	5 - SABLE FAIBL. ARGILEUX
	AB	12 - 40 cm	11 à25 - ARGILO-SABLEUX	10 à 15 - SABLO-ARGILEUX
	B 1	40 - 80 cm	25à40 - ARGILE SABLEUSE	15 à 30 - ARGILO-SABLEUX (AVEC "GRANULES")
	B 2	80 -250 cm	40à45 - ARGILE	(25) - SABLO-LIMONO-ARGILEUX, devenant ARGILO-SABLEUX par MALAXAGE.
DE TRANSI-TION	A	0 - 12 cm	9 - SABLO-ARGILEUX	2 à 12 - SABLE FAIBL. ARGILEUX
	AB	12 - 35 cm	11à25 - SABLO-ARGILEUX à ARG. SABL.	12 à 25 - SABLO-ARGILEUX à ARG. SABLEUX.
	B 1	35 - 80 cm	25à46 - ARGILE SABLEUSE à ARGILE.	25 à40 - ARGILE SABL. à ARGILEUX.
	B 21 et B 22	80 -250 cm	46à54 - ARGILE.	25 à 35 - ARGILE SABLEUSE
BEIGE	A	0 - 17 cm	10 - SABLO-ARGILEUX	2 à 12 - SABLE FAIBL. ARGILEUX
	AB	17 -35 cm	10 à 14 - SABLO-ARGILEUX à ARG. SABL.	12 - SABLO-ARGILEUX.
	B 1	35 -110 cm	14à35 - ARGILO-SABL. à ARGILE SABL.	12 à 35 - ARGILO SABLEUX à ARGILE SABLEUSE.
	B 21 et B 22	110-210 cm	35à30 - ARGILE SABLEUSE.	30 - ARGILE SABLEUSE.

Il résulte de cette distorsion que :

- alors que la seule impression de texture révélait le sol beige comme étant légèrement plus argileux que le rouge au niveau des horizons B 1 et B 2, l'emploi de la méthode d'analyse granulométrique intervertit l'ordre de ce classement,

- un effet semblable se manifeste au sein des profils. Ainsi, dans le sol de transition, caractérisé par les textures les plus argileuses (40 %) et les teneurs en argile granulométrique les plus fortes (54 %), les niveaux correspondants aux deux maximums (mesuré et apprécié) ne coïncident pas mais sont décalés, le premier dans l'horizon B 21, le deuxième dans l'horizon B 1.

Une disposition comparable est observée sur les autres versants des toposéquences et sur les axes transversaux étudiés.

Il apparaît ainsi que ce caractère de distorsion (entre granulométrie et texture) se distribue dans le paysage en zones concentriques: (fig 6-6)

- au milieu, les sols rouges sont caractérisés par des profils dont les textures sont, dans leur ensemble, plus sableuses que ne le laissent supposer les résultats de l'analyse granulométrique.

- une frange étroite de sols de transition (large d'une centaine de mètres, située à la limite entre les sols "rouge jaune" et les sols "beige rose") l'entoure, dont les profils se distinguent à la fois par le maximum élevé ($\geqslant$45 %) du taux d'argile granulométrique localisé au sommet de l'horizon B 2, et par les impressions de texture les plus argileuses décelées dans le niveau immédiatement supérieur (horizon B 1).

- à la périphérie, les sols beiges ont des caractéristiques granulométriques (maximum d'argile de l'ordre de 35 %) qui s'accordent sensiblement avec les impressions de texture.

Avant de poursuivre cette étude, il est utile de se reporter aux descriptions de profils et aux données analytiques disponibles, relatives à d'autres sols de moyenne Casamance (MAIGNIEN 1961, TOBIAS, 1965, CHAUVEL, 1968, SEGUY, 1969, FAUCK, 1963-1972) afin d'apprécier la généralité des caractères mis en évidence.

On constate alors :

- que les écarts entre les impressions de texture et les don-

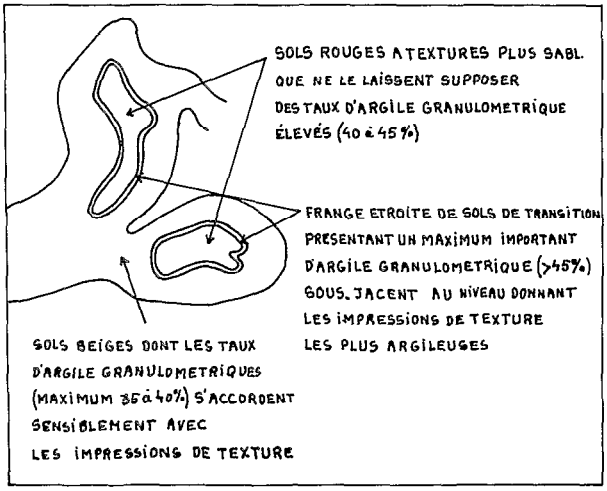


Fig. 6-6 - Distribution des distorsions "granulométrie-texture" en zones concentriques, dans le paysage.

nées granulométriques sont habituels en ce qui concerne les sols rouges, tandis que la concordance est satisfaisante pour les beiges,

- que les textures les plus argileuses et les taux d'argile granulométrique les plus élevés sont fréquemment relevés (parfois décalés les uns par rapport aux autres) dans des profils qui, par leurs caractères morphologiques, leur situation dans la toposéquence (TOBIAS) ou leur appellation même (SEGUY) se présentent comme des sols de transition.

Il apparaît ainsi que les distorsions et les concordances décelées entre les appréciations de texture et les données granulométriques ne sont pas accidentelles mais qu'elles expriment des caractéristiques intrinsèques, des sols étudiés, en relation avec la place que ceux-ci occupent dans le paysage.

Des caractéristiques comparables à celles des sols de transition (maximum élevé d'argile granulométrique au sommet de l'horizon B 2, sous-jacent au niveau dont la texture est la plus argileuse) se retrouvent dans les rouges cultivés à contrastes de couleur (fig. 6-7) La mise en culture aurait donc pour effet de développer, dans ce cas, un caractère de différenciation texturale analogue à celui qui marque le passage des sols rouges aux sols beiges.

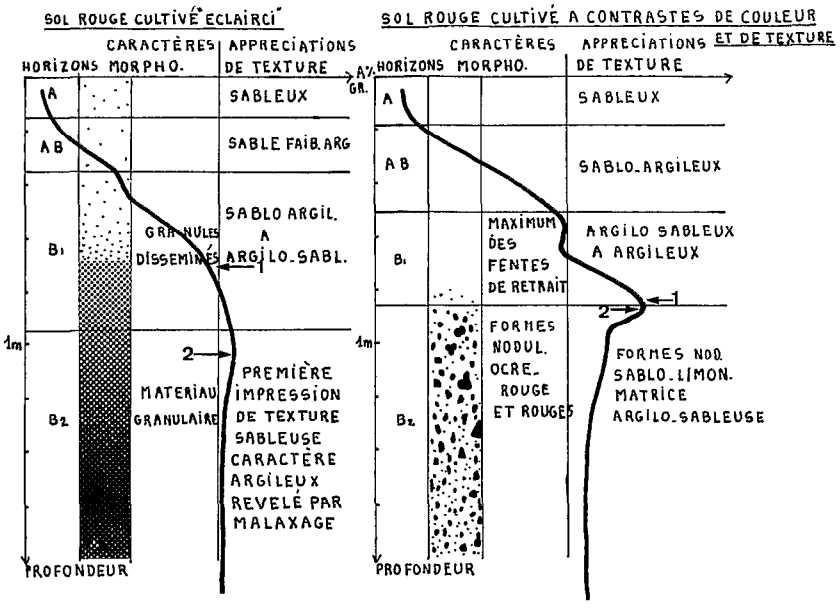


Fig. 6-7 - Variations verticales de l'argile granulométrique et de la texture en relation avec la distribution des granules et nodules (sous culture).

Les anomalies propres à la texture de certains horizons de sols étudiés ne peuvent avoir pour origine les particularités du matériau originel (nature, forme et dimensions des constituants), puisque celui-ci reste comparable d'un bout à l'autre de la toposéquence étudiée et qu'une telle hypothèse ne saurait expliquer les variations liées à la mise en culture. Il convient donc de rechercher leur cause dans l'organisation même des matériaux pédologiques, en nous reportant tout d'abord aux caractéristiques morphologiques.

On constate que cette distorsion va de pair, dans le sol, matériau rouge, avec une sous-structure microgrenue et avec une consistance particulière à l'état humide, caractérisée par la présence de "granules", d'abord perçus au toucher comme des sables, puis écrasés sous la pression des doigts et ne révèlant que progressivement la nature argileuse de leur ciment (impression de texture changeante).

Une distorsion moindre est décelée dans le sol de transition, là où se reconnaissent, limitées aux formes nodulaires et nodules, une sous-structure et une consistance analogues.

Elle disparaît à mesure que se développe la cimentation de ces nodules et que la présence d'argile y devient imperceptible au toucher (différenciation d'un cortex et évolution vers des couleurs plus brunes).

Elle est nulle enfin dans les horizons B 1 de sol beige qui ne présentent ni granules, ni formes nodulaires.

Il apparaît ainsi que l'écart entre texture et granulométrie est lié à la présence d'éléments figurés, plus ou moins bien différenciés et relativement fragiles (susceptibles de s'écraser totalement sous la pression des doigts). Il diminue ou disparaît dans les horizons où ces éléments sont rares ou absents et dans ceux qui ne contiennent que des éléments plus fortement cimentés (nodules à cortex et concrétions).

c) Hypothèse proposée pour expliquer la distorsion entre "granulométrie et texture" .

C'est à partir des données recueillies sur le terrain (description morphologique et évaluation de la texture) et des résultats acquis au laboratoire (composition granulométrique mais aussi observation et analyse thermogravimétrique des sables et limons) qu'a été établi le schéma (tableau 6-2) destiné à rendre compte des distorsions mises en évidence.

Deux traitements, mettant en œuvre des énergies mécaniques et des actions différentes (pression des doigts après humectation par l'eau dans un cas, agitation mécanique prolongée en présence de réactifs dispersants dans l'autre) ont été appliqués, sur le terrain puis au laboratoire, aux mêmes matériaux.

L'observation des sables séparés par l'analyse granulométrique à partir du matériau de sol rouge, typique révèle la présence de particules complexes (ou pseudoparticules) comparables à l'ensemble des autres agrégats (sous structure microgrenue) mais dont la résistance s'est révélée supérieure au seuil correspondant à l'agressivité de la méthode de préparation granulométrique.

Aucune discontinuité ne séparant, dans ce cas, ces "pseudoparticules" des autres agrégats, il est vraisemblable que la résistance de certains de ces derniers se situe à des niveaux un peu inférieurs au seuil considéré, suffisants toutefois pour que leur présence soit d'abord perçue au toucher, à l'état humide, comme celle de grains de sables.

Tableau 6-2.

LES CAUSES DE LA DISTORSION ENTRE L'APPRÉCIATION TACTILE DE LA TEXTURE ET LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMÈTRIQUE.

SOLS	RESISTANCE CROISSANTE DES AGREGATS ARGILEUX → (Appréciation tactile ↓ / Traitement granulométrique ↓)			DISTORSION GRANULO. / TEXTURE.
ROUGE (Horizons B 3, B 2)	Matériau rouge constitué de "granules" plus ou moins résistants →			+ +
DE TRANSITION (Horizon B 21)	Matériau rouge clair → contenant quelques "granules"	Nodules fragmentés → et partiellement dispersés par le traitement granulométrique		+
BEIGE (Horizon B 1)	Matériau beige → argilo-sableux			0
	Argile directement perceptible au toucher après humectation	Argile perçue au toucher comme du sable, mais dispersée par l'analyse (distorsion)	"Pseudoparticules" séparées avec les sables granulométriques.	

Dissociés lors de l'analyse, ces agrégats fournissent alors de l'argile granulométrique. Ce sont donc eux qui seraient à l'origine des discordances.

L'argile contenue dans les assemblages les plus fragiles serait seule directement perçue au toucher, contribuant à l'impression immédiate de texture.

Dans les sables séparés par l'analyse granulométrique à partir du sol de transition se reconnaissent, outre les grains de quartz, des particules complexes différentes de l'ensemble des autres agrégats (sous forme de fragments de nodules rouge sombre) et quelques autres, plus petites, comparables aux granules du sol rouge.

Ces assemblages résistants aux traitements dispersants, en discontinuité avec le reste du sol, ne sont à l'origine d'aucune distorsion. Seuls des granules rouges disséminés et les parties les plus fragiles des nodules, perçues au toucher comme des sables et dispersés par le traitement granulométrique, sont responsables de l'écart entre les évaluations de la texture et les taux d'argile séparés par l'analyse.

L'horizon B 1 de sol beige ne contient aucun assemblage qui soit suffisamment cohérent à l'état humide pour donner l'impression tactile de la présence de sable ; ceci explique la concordance entre les taux d'argile appréciés et mesurés.

Ce travail a mis en évidence des désaccords entre les données granulométriques et les appréciations de texture. Bien que ces dernières soient, en partie, subjectives et soumises, de ce fait, à une grande imprécision, elles ont suffi, cependant, à montrer que les écarts entre les résultats de l'analyse et les caractéristiques texturales n'étaient pas fortuits, mais qu'ils pouvaient être reliés, à la fois aux couleurs des sols, et à leurs caractéristiques d'organisation observées sur le terrain dans des profils typiques. Cet écart est donc révélateur d'une caractéristique fondamentale du matériau qui ne pouvait être perçue à partir des seules données granulométriques.

d) Relations entre les données granulométriques et la rétention de l'eau à pF 3.

Afin d'établir sur des bases plus objectives les caractères expri-

més par la distorsion entre les résultats de l'analyse granulométrique et la texture du sol, nous ferons ici appel aux mesures d'une propriété physique du sol, habituellement considérée comme étant dépendante de la taille des constituants : la rétention de l'eau à pF 3.

Des études statistiques (COMBEAU, 1960) ont montré que cette valeur est globalement liée aux taux d'argile par des coefficients de corrélation qui diffèrent selon les types de sol, même lorsque ces derniers sont caractérisés par la même dominance de kaolinite (sensiblement inférieurs dans les sols ferrallitiques de Bambari, R. C. A., à ce qu'ils sont dans les sols beiges de Séfa, Casamance).

Les taux d'argile et les humidités à pF 3 correspondants à 3 profils de sols étudiés, sont reportés sur la fig. 6-8.

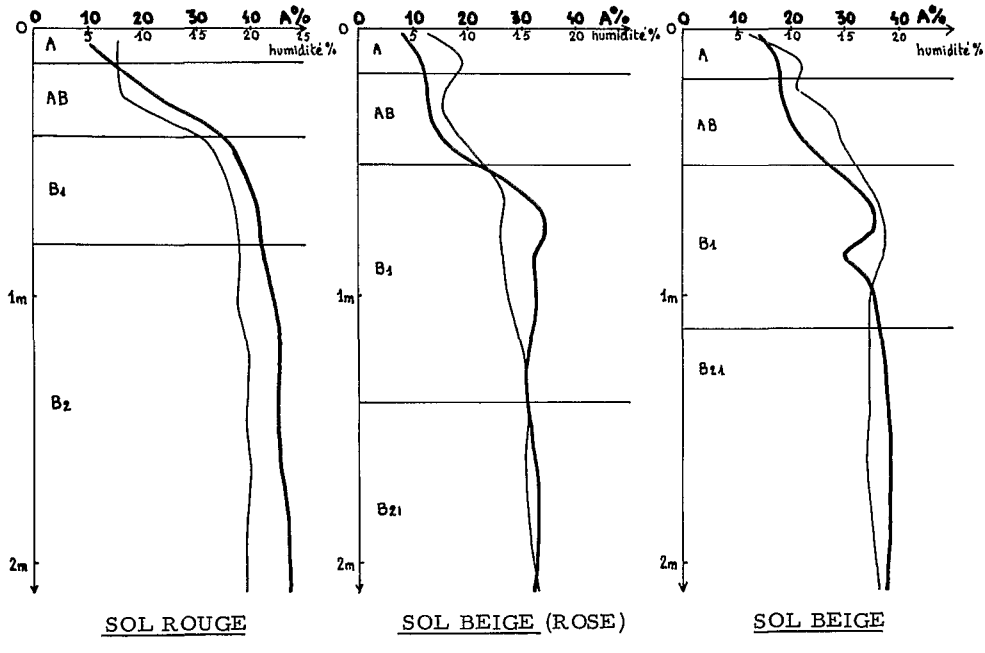


Fig. 6-8 - Taux d'argile granulométriques et humidités à pF 3.

On constate que la relation entre le taux d'argile et l'humidité équivalente est sensiblement constante (H %/A % $\#$ 0,45) dans la plus grande partie du profil de sol rouge (mis à part l'horizon A), mais qu'elle

se modifie fortement lorsqu'on passe au sol beige, marquée par une augmentation relative de l'humidité (H %/A % atteignant alors des valeurs comprises entre 0, 5 et 0, 75) qui affecte d'abord les horizons A et AB puis l'ensemble de l'horizon B 1.

Une telle variation ne peut résulter de la sous-estimation de l'argile due à l'analyse granulométrique (celle-ci affectant plus le sol rouge, réfractaire au traitement dispersant, que le beige entraînerait en effet une variation en sens inverse)[1]. Elle exprime donc indiscutablement que l'argile des horizons AB et B 1 du sol beige est plus efficace que celle du sol rouge pour retenir l'eau dans les conditions considérées (qui aboutissent à un état d'humidité voisin de celui du sol ressuyé en place.)

Ces résultats tendent à faire apparaître les horizons A, AB et B 1 du sol beige comme étant au moins aussi argileux que ceux du sol rouge dont les taux d'argile granulométrique sont cependant sensiblement plus élevés. Ils sont conformes aux appréciations tactiles de la texture qui expriment, dans ce cas, mieux que ne le font les données granulométriques, le caractère argileux du sol, défini ici par son aptitude à retenir l'eau.

L'étude des relations portant sur des valeurs globales suppose l'additivité des propriétés de tous les constituants argileux du sol. Or, on constate que la rétention de l'eau à pF 3 ne s'exerce pas avec la même efficacité quels que soient les profils et les horizons. L'approche utilisée ici est donc insuffisante. Aussi conviendra-t-il de trouver des méthodes analytiques plus aptes à caractériser de façon satisfaisante la "texture" des matériaux étudiés.

---

(1) Il en va autrement en ce qui concerne la rétention de l'eau sous une pression de 15 bars (pF : 4, 2) préconisée par l'U. S. D. A. (1960) pour l'estimation indirecte des taux d'argile ($\phi < 2\ \mu$) dans les oxisols (parmi lesquels se rangent en première approximation les sols rouges de Casamance), réfractaires aux traitements dispersants. Dans ce cas, le rapport H %/A % plus élevé dans les sols ferrallitiques que dans les sols ferrugineux, peut être accru par une dispersion incomplète.

6/ - Conclusions.

Aucun des objectifs fixés n'est ici pleinement atteint puisque les données granulométriques ne rendent compte, de façon systématique, ni de la distribution dimensionnelle des individus cristallins, ni de l'influence propre des particules de différentes tailles sur le comportement physique des sols.

C'est seulement en associant aux résultats de l'analyse granulométrique d'autres données (observation et analyse thermogravimétrique des sables ; appréciation, directe et indirecte, de la texture) qu'il est possible d'aboutir à deux déductions importantes :

- seules sont ici significatives de l'origine du matériau les granulométries des sables constitués de particules primaires. Ceux extraits des échantillons prélevés à la base de l'apexsol (de 80 à 110 cm) dans le sol rouge et le sol beige de la toposéquence de Salikenié remplissent approximativement cette condition ; leurs distributions dimensionnelles très voisines indiquent qu'ils proviennent, vraisemblablement, du même matériau originel (ou de matériaux comparables).

- Les écarts entre les classements granulométriques et les textures appréciées sur le terrain expriment une caractéristique intrinsèque des matériaux de sol rouge dont une partie des constituants argileux semble être incluse au sein d'assemblages relativement fragiles, se comportant à certains égards comme des sables, mais plus ou moins dissociés par l'analyse granulométrique. L'origine de ce "masquage" sera étudiée ultérieurement.

Chapitre 7

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS

L'analyse chimique est appliquée à des échantillons de sol transformés en une masse homogène par broyage et tamisage.

Les résultats représentent donc des valeurs moyennes pour l'échantillon entier, sans référence à la distribution de ses différents constituants. On parvient toutefois à ne caractériser que certaines fractions en faisant appel à des méthodes d'attaque plus ou moins sélectives.

L'étude présentée ici porte d'abord sur :

A - les caractéristiques chimiques globales

B - la matière organique

C - les propriétés physico-chimiques du complexe absorbant.

A - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES GLOBALES.

1/ - Données générales sur quelques sols de la région de Séfa.

a) Analyse totale.

Les résultats de l'analyse de quelques échantillons de sols rouges et beiges, après fusion au carbonate acide de sodium et attaque fluohydrique figurent dans le tableau 7-1.

Il ressort de leur examen :

- que les différences de composition globale entre les deux

sols sont faibles ou inexistantes. Seules retiennent ici l'attention des teneurs en silice un peu plus fortes et des teneurs en aluminium et en fer légèrement moindres dans le sol beige. Cet écart, fréquemment mis en évidence, n'est cependant pas systématique, puisque les taux de Al_2O_3 et de Fe_2O_3 atteignent dans certains sols beiges respectivement 18 % et 4, 9 % (FAUCK, 1963), valeurs comparables aux plus fortes teneurs décelées dans le sol rouge.

Tableau 7-1.

ANALYSE TOTALE DE QUELQUES ECHANTILLONS DE SOL ROUGE ET BEIGE.

SOL	ROUGE		BEIGE	
PROFONDEUR	0 - 10 cm	200 cm	0 - 10 cm	200 cm
Perte au feu	2, 60	6, 80	2, 10	4, 40
$Si O_2$	93, 25	70, 90	93, 92	75, 32
$Al_2 O_3$	2, 90	16, 20	2, 50	14, 80
$Fe_2 O_3$	1, 15	4, 30	0, 90	3, 30
$Ti O_2$	0, 38	1, 00	0, 45	1, 10
$Mn O_2$	0, 03	0, 02	0, 03	0, 02
Ca O	0, 15	0, 07	0, 06	0, 14
Mg O	0, 10	0, 09	0, 04	0, 08
K_2O	0, 10	0, 18	0, 11	0, 17
$Na_2 O$	0, 12	0, 17	0, 18	0, 16
TOTAL	100, 8	99, 73	100, 29	99, 49

- que ces données expriment surtout la composition minéralogique simple des matériaux pédologiques (héritée d'une roche mère commune) en accord avec les résultats des investigations minéralogiques (analyse thermo-gravimétrique et thermique différentielle, rayons X) qui ne décèlent que la présence de kaolinite, de quartz et d'oxy-hydroxydes de fer Ainsi s'explique la pauvreté en métaux alcalins et alcalino-terreux qui caractérise l'ensemble des sols étudiés.

b) Méthode triacide (HARRISON, 1933)

Elle a pour objectif de ne dissoudre que les constituants amorphes et les minéraux secondaires du sol. Dans la mesure où elle y parvient, elle fournit une caractérisation intéressante du "complexe d'altération" en relation avec la pédogénèse.

Dans tous les échantillons analysés, les teneurs en métaux alcalins et alcalino-terreux obtenues par cette méthode sont aussi faibles et présentent le même ordre de grandeur que les résultats fournis par l'analyse totale. Ceci indique que ces métaux sont présents sous des formes liées au complexe d'altération.

Les quantités de $Si\ O_2$ et de Al_2O_3 solubilisées par le réactif triacide, théoriquement issues des seuls minéraux secondaires, permettent de calculer le paramètre moléculaire $Ki = \frac{Si\ O_2}{Al_2O_3}$ et d'établir la composition minéralogique quantitative (tableau 7-2).

Il apparaît que les valeurs du paramètre Ki sont ici toujours voisines de 2, nettement supérieures seulement dans les horizons superficiels. L'examen de toutes les données analytiques disponibles pour la moyenne Casamance montre que les valeurs les plus élevées correspondent le plus souvent à des échantillons de sol beige. Ceci a parfois conduit à considérer la valeur 2 comme une limite entre les sols ferrugineux et les sols ferrallitiques, tout en faisant des réserves sur l'imprécision d'une telle détermination (FAUCK, 1963, 1968).

Or, l'accroissement de ce rapport dans les niveaux sableux superficiels est généralement attribué à la dissolution du quartz lors de l'attaque triacide (CLAISSE, 1968) ; il est de règle chaque fois que le résidu total (représentant le quartz) est supérieur à 65-70 %. Il est vraisemblable que la même cause d'erreur intervient aussi, mais dans une moindre mesure, lorsque les teneurs sont inférieures à cette valeur, entraînant une surestimation de la silice des silicates (et donc du rapport $Si\ O_2/Al_2O_3$).

Sachant que les méthodes d'investigation minéralogique ne révèlent dans ces horizons superficiels que la présence de quartz, d'oxy-hydroxydes de fer et de kaolinite, on peut supposer que la valeur exacte de leur paramètre Ki est bien égale à 2. Partant de la teneur en Al_2O_3, il est alors possible de calculer la quantité de silice dissoute provenant des silicates,

Tableau 7-2.

RESULTATS DE L'ANALYSE TRIACIDE.

PROFONDEURS	SOLS ROUGES				SOLS BEIGES				
HORIZONS	0 -10cm A	200 - 210 cm B 2	400 - 410 cm B 3	650 - 660 cm	0-10 cm A	200 - 210 cm B 22	0-6 cm A	6-13 cm A	117 - 150 cm B 21
RESIDU TOTAL %	89,30	51,80	47,65	46,15	90,30	66,90	86,32	87,20	49,44
SiO_2 %	3,90	19,45	21,10	21,70	3,80	13,45	4,47	4,53	20,47
Al_2O_3 %	2,80	16,25	17,75	18,30	2,50	11,20	3,30	3,40	17,25
Ki ($=\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$)	2,37	2,03	2,02	2,01	2,52	2,03	2,32	2,28	2,03
Ki CORRIGE	(2,00)	2,00	1,99	1,99	(2,00)	1,94	(2,00)	1,96	1,98
KAOLINITE (déduite de Al_2O_3) %	7,1	41,1	44,9	46,3	6,3	28,5	6,3	8,6	43,6
ARGILE ($\phi < 2\mu$) %	7,5	47,1	50,2	52,7	8,1	32,1	9,4	9,4	40,1

et par différence celle venant du quartz, puis de rapporter cette valeur au taux de résidu total (quartz). Selon les profils cette évaluation du taux de silice dissoute (exprimée en % du quartz) reste comprise entre 0, 68 (sol rouge) et 0, 95 (sol beige).

Or les travaux de CLAISSE ont montré que la relation entre la dissolution de $Si\ O_2$ au cours du traitement triacide et la taille des grains de quartz était exponentielle pour les classes granulométriques considérées. Des valeurs de 0, 68 % et 0, 95 % correspondent, selon lui, à des diamètres proches de 100 µ, voisins de la valeur médiane déduite des données granulométriques (160 µ). Il est vraisemblable que l'état de fracturation interne des grains intervient également sur leur solubilisation.

Supposant que cette cause d'erreur est la même sur l'ensemble du profil (compte tenu des granulométries comparables du quartz), on pourra calculer sur cette base les corrections à apporter au paramètre moléculaire Ki. Remarquons que celles-ci sont plus importantes pour les sols beiges, plus riches en quartz (lui-même plus apte à être solubilisé) qu'elles ne le sont pour les sols rouges.

Cette cause d'erreur systématique dans les données fournies par l'analyse triacide suffit à expliquer les différences de valeur du paramètre Ki, relevées entre les sols rouges et les sols beiges de moyenne Casamance. Des valeurs corrigées très voisines de 2 dans tous les sols indiquent l'absence d'alumine libre en quantité appréciable et la présence exclusive de Kaolinite (en tant que silicate). Cette conclusion est confirmée par toutes les déterminations faites à l'aide des rayons X.

Ce résultat nous autorise à calculer les taux de kaolinite à partir de Al_2O_3 % et à comparer les valeurs ainsi obtenues aux teneurs en argile ($\phi < 2\ \mu$) (tableau 7-2).

Ces données sont, dans l'ensemble comparables entre elles, ce qui signifie que les résultats de l'analyse granulométrique, malgré les réserves faites à leur sujet, sont approximativement représentatifs de la teneur en minéraux argileux et qu'il est donc opportun de se référer à eux pour l'étude des autres données analytiques.

Leurs écarts ont des significations différentes selon leur sens :

- ainsi, des taux de kaolinite supérieurs aux teneurs en argile ($\phi < 2\ \mu$) (sol beige de 117 à 150 cm) suggèrent une dispersion in-

complète, confirmée par la présence de fragments opaques hétérogènes dans les sables issus de l'horizon B 21 de sol beige (identifiés par l'analyse thermogravimétrique comme étant constitués de kaolinite et d'hydrates ferriques),

- à l'inverse, des teneurs en argile supérieures aux taux de kaolinite (de 11,8 à 14,6 % dans les horizons B de sol rouge, de 9,3 à 12,6 % dans les horizons B de sol beige, de 28,9 à 49 % dans les horizons A de sol beige en valeurs relatives) indiquent vraisemblablement la présence d'oxyhydrates de fer et de matière organique dans les fractions argileuses des sols considérés.

2/ - Distribution et forme du fer.

a) Analyse du "fer total"* (extraction par H Cl pur à l'ébullition) dans la toposéquence de Salikénié.

Les variations verticales des résultats obtenus sont représentés sur la figure 7-1. Afin d'apprécier les relations éventuelles entre les formes du fer et l'argile granulométrique ($\varnothing < 2\ \mu$), la distribution de cette dernière fraction dans le profil a été portée en surcharge sur les graphiques.

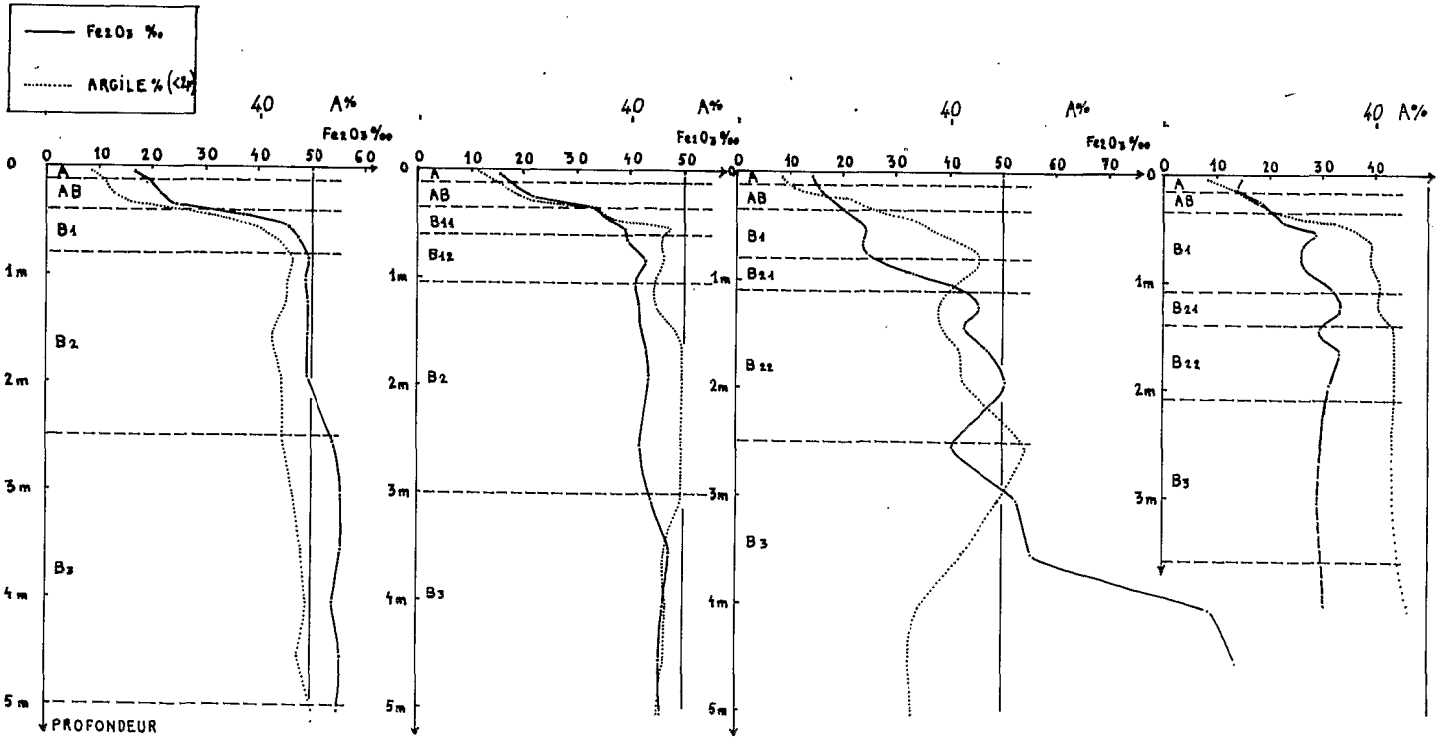
L'examen des courbes de distribution du fer dans le profil conduit à deux groupes de remarques :

- Dans leur ensemble, les teneurs en "fer total", exprimées en Fe_2O_3, sont voisines de 5 % sur une grande partie du sol rouge typique, nettement inférieures à cette valeur jusqu'à 3 mètres de profondeur dans le sol rouge jaune, tandis qu'elles présentent des fluctuations importantes et des valeurs élevées dans le sol de transition et qu'elles sont sensiblement plus faibles et accusent des variations nettes dans le sol beige typique.

- La partie la plus superficielle des profils est toujours appauvrie en fer, sur une profondeur qui croît progressivement en allant des sols rouges aux sols beiges (3 % atteint à 35-40 cm dans les sols rouges, à 90 cm dans le sol de transition, à 1 mètre dans le sol beige). A cette dimi-

---

* Les résultats obtenus par cette méthode, comparés à ceux fournis par l'analyse "triacide" ou par fusion ($CO_3K\ Na + FH$) sont parfois égaux, souvent inférieurs de 10 % ou plus, particulièrement dans les horizons nodulaires.



SOL ROUGE TYPIQUE (PROFIL 13) SOL "ROUGE JAUNE" (PROFIL 9) SOL DE TRANSITION (PROFIL 5) SOL BEIGE (PROFIL 2)

Fig. 7-1 - Variations verticales des teneurs en fer "total" (exprimées en Fe_2O_3 °/₀₀) et en argile ($\varnothing < 2\ \mu$ - exprimées en A %) dans 4 sols de la toposéquence de Salikenié.

Fe_2O_3 °/₀₀
Argile % ($< 2\ \mu$)

nution des teneurs en fer à partir de la surface correspond une accentuation des variations plus profondes, marquée en particulier par le développement de deux maximums (ou plus), l'un relatif ou absolu dans l'horizon B 1 (vers 60 cm), l'autre dans l'horizon B 2 (à 1,25 m dans le sol de transition et dans le sol beige).

La relation avec la distribution verticale de l'argile ($\phi < 2\ \mu$) suggère d'autres constatations.

- Dans le sol rouge typique, les variations verticales des teneurs en fer et en argile sont concordantes, leur rapport étant supérieur à 0,1 sur l'ensemble du profil, maximum en surface (0,21) et dans les horizons B 2 et B 3 (0,13).

- Dans le sol rouge jaune, la concordance existe toujours, tandis que le rapport Fe_2O_3/argile devient inférieur ou égal à 0,1 dans les horizons B. L'individualisation des formes nodulaires au sommet de l'horizon B 2 se manifeste donc dans un matériau relativement appauvri en fer.

- Dans le sol de transition, les variations verticales des teneurs en fer et en argile sont discordantes. Le rapport Fe_2O_3/argile présente alors un maximum en surface (0,17) et dans l'horizon B 21 (0,13) et un minimum très marqué à la base de l'horizon B 1 (0,06).

- Dans le sol beige typique, enfin, la relation entre la distribution du fer et celle de l'argile est lâche. Le rapport Fe_2O_3/argile reste cependant voisin de 0,06 dans les horizons B.

b) Analyse du "fer total" dans la séquence d'évolution des sols rouges cultivés.

Les variations verticales des teneurs en fer (et en argile granulométrique) sont représentées sur la figure 7-2.

On constate que ces teneurs tendent à diminuer (de même que les taux d'argile) dans toute la partie supérieure du profil (horizons A, AB et B 1) en fonction de l'ancienneté de la mise en culture.

Il apparaît également que si les variations des teneurs en fer et en argile sont approximativement concordantes dans le sol rouge sous forêt, elles le restent après 12 ans de culture (alors que le sol est relativement appauvri en fer), mais leur relation devient moins constante après 90 ans (du fait de l'amplitude plus grande que prennent les variations des teneurs

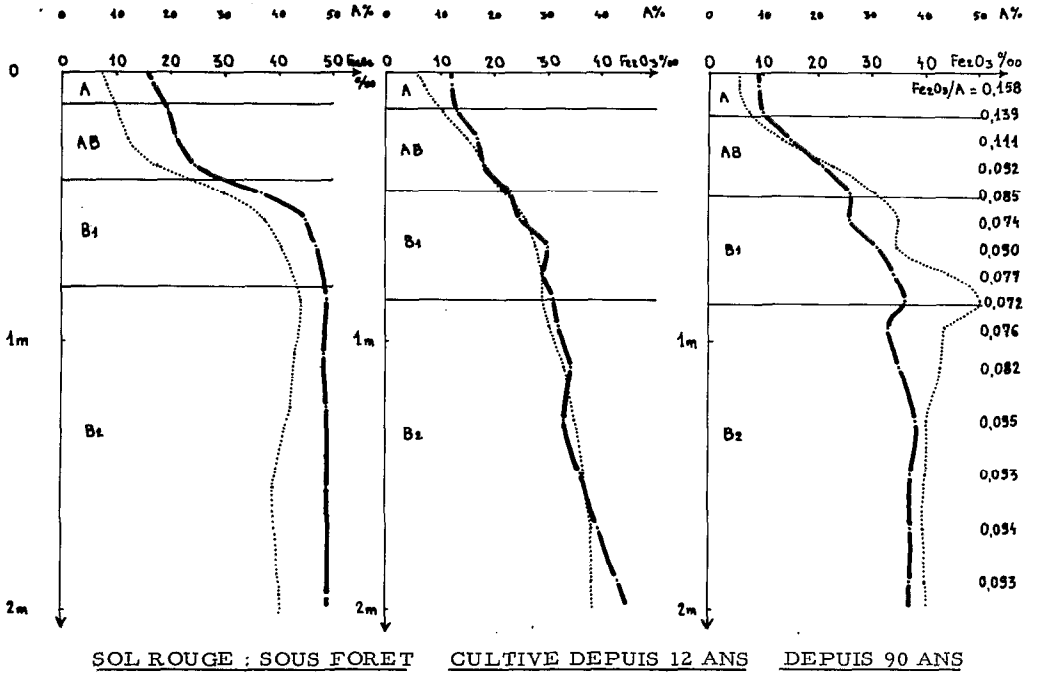


Fig. 7-2 - Variations verticales des teneurs en fer total (Fe_2O_3 °/₀₀) et en argile dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture.

—— Fe_2O_3 °/₀₀
····· Argile %

en argile, comparées à celles du fer). Dans ce dernier cas, le rapport Fe_2O_3/argile, maximum dans l'horizon superficiel (0, 158), varie en sens inverse du taux d'argile granulométrique dans l'horizon B 1 et le sommet de B 2 (minimum 0, 074 et 0, 072) et se stabilise au voisinage de 0, 095 au-dessous.

Sans atteindre des discordances comparables à celles qui caractérisent le sol de transition, les relations entre les variations verticales du fer et de l'argile ($\phi < 2\ \mu$) tendent ainsi à devenir plus lâches dans les sols rouges les plus anciennement cultivés.

c) Signification du rapport "Fer total"/argile.

Elle n'est probablement pas constante tout au long de la toposéquence et de la séquence d'évolution des sols rouges cultivés.

Elle dépend en particulier de la nature des composés ferriques,

dont certains seraient plus ou moins associés à l'argile :

Les rayons X ne révèlent la présence que de petites quantités ou de traces de fer à l'état cristallin (hématite et gœthite), surtout incluses dans les quartz, à peine plus abondantes dans les sols rouges que dans les beiges.

La caractérisation des fractions "amorphes" par la méthode SEGALEN (1968) révèle des différences plus marquées entre les sols (fig. 7-3).

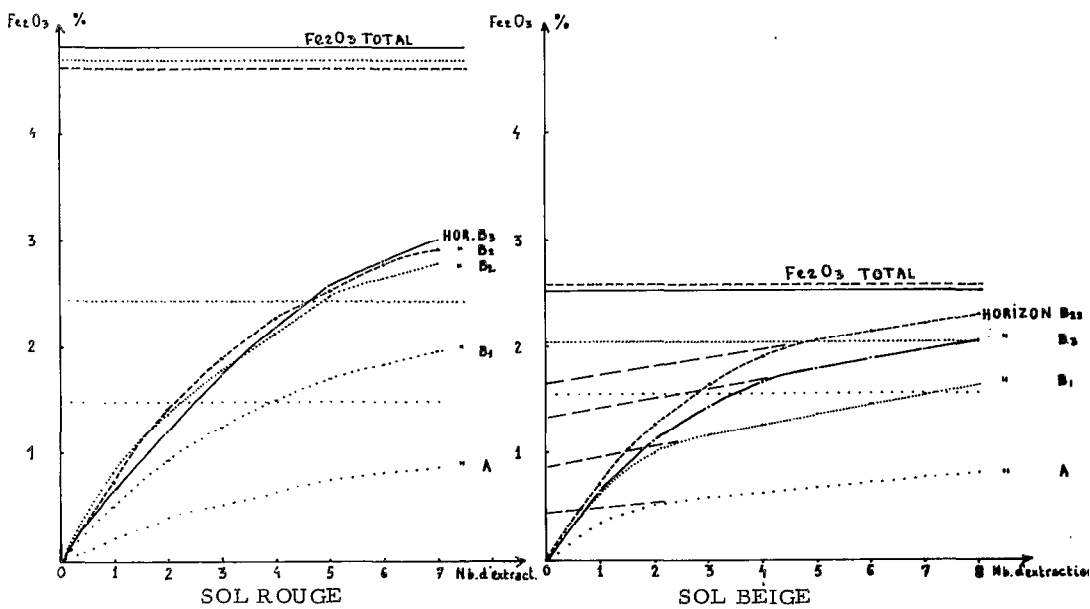


Fig. 7-3 - Courbes d'extraction du fer "amorphe" (méthode SEGALEN, 1968).

Les courbes cumulatives de dissolution caractéristiques des horizons B 2 et B 3 de sol rouge présentent une succession graduelle de changements de pente, telle qu'il est difficile de leur tracer une tangente. Selon LAMOUROUX et QUANTIN (1973), cette allure indiquerait une continuité entre l'état amorphe et l'état crypto-cristallin (hématite).

La courbe relative à l'horizon B 1 de sol rouge se rapproche davantage de celles qui caractérisent le sol beige. Dans ces dernières se

distingue une branche d'allure parabolique et une autre faiblement inclinée, sensiblement rectiligne, qu'il est facile de prolonger vers l'axe des y de façon à déterminer les teneurs en fer "amorphe". Celles-ci sont croissantes depuis la surface (0,44 %) jusqu'à l'horizon B 22 (1,66 %). Elles représentent de 28 à 67 % du "fer total". Selon les cas, la signification du rapport de cette fraction au taux d'argile est nécessairement différente.

Elle est, par ailleurs, limitée par les distorsions systématiques qui résultent de la présence de particules complexes (ou de fragments de nodules) réfractaires au traitement dispersant de l'analyse granulométrique, (et donc considérés comme des sables) mais constitués principalement de kaolinite et d'hydrates ferriques (pris en compte par l'analyse du fer "total") (cf. chap. 6). Telle pourrait être la cause de certaines discordances (entre les variations verticales des taux de fer total et d'argile) relevées dans les horizons nodulaires du sol de transition.

Pour lever cette indétermination, il conviendra d'examiner ultérieurement les formes d'association des oxy-hydrates de fer et de la kaolinite.

3/ - Conclusions.

Les résultats de l'analyse chimique globale mettent surtout en évidence des caractères communs à tous les sols étudiés :

- paramètre moléculaire Ki toujours très peu différent de 2 (compte tenu des corrections faites),
- très grande pauvreté en métaux alcalins et alcalino-terreux,
- teneurs en Fe_2O_3 comprises entre 1 et 9 %.

A côté du quartz et de la kaolinite, les oxy-hydrates de fer sont donc les seuls constituants présents en quantités importantes. Le problème de leurs relations avec ces espèces minéralogiques est donc à poser.

Les rapports des teneurs en Fe_2O_3 aux taux d'argile sont approximativement constantes dans les sols rouges sous forêt, ils sont, à l'inverse lâches ou même discordants dans les autres sols.

Il semble donc qu'intervienne une disjonction entre le fer et l'argile au niveau du sol de transition, en relation avec la redistribution et/ou le blocage de ces constituants dans les différents horizons à l'aval de

la toposéquence.

Une évolution comparable apparaît dans la séquence d'évolution des sols rouges, après 90 années de culture.

B - CARACTERISTIQUES ORGANIQUES DES SOLS.

Nous examinerons successivement :

- les données quantitatives fournies par le dosage du carbone dans les échantillons de quelques profils caractéristiques de la toposéquence et de la séquence d'évolution des sols rouges cultivés.
- les caractéristiques qualitatives, obtenues par des méthodes plus élaborées, et qui ont fait l'objet d'études approfondies (THOMANN, 1964) portant sur des sols situés à Séfa et en d'autres points de moyenne Casamance.

1/ - Teneurs en matière organique.

Elles sont exprimées ici en carbone °/$_{oo}$ de terre fine.

a) Distributions verticales de la matière organique dans quelques profils de la toposéquence de Salikenié. Relations avec les données morphologiques et granulométriques.

Les résultats de l'analyse sont représentés sur la figure 7-4.

Les caractères généraux à l'ensemble des profils sont les suivants :

- diminution rapide du taux de carbone depuis la surface jusqu'à 15-25 centimètres de profondeur,
- existence d'un deuxième niveau, plus ou moins bien individualisé, compris entre 15-25 et 50-80 centimètres, dans la partie supérieure de l'horizon B 1 (marqué d'une flèche sur la figure),
- décroissance progressive ou maintien au voisinage de 1 à 2 °/$_{oo}$ dans les horizons plus profonds.

Les variations latérales au sein de la toposéquence portent sur la différenciation de chacun de ces niveaux :

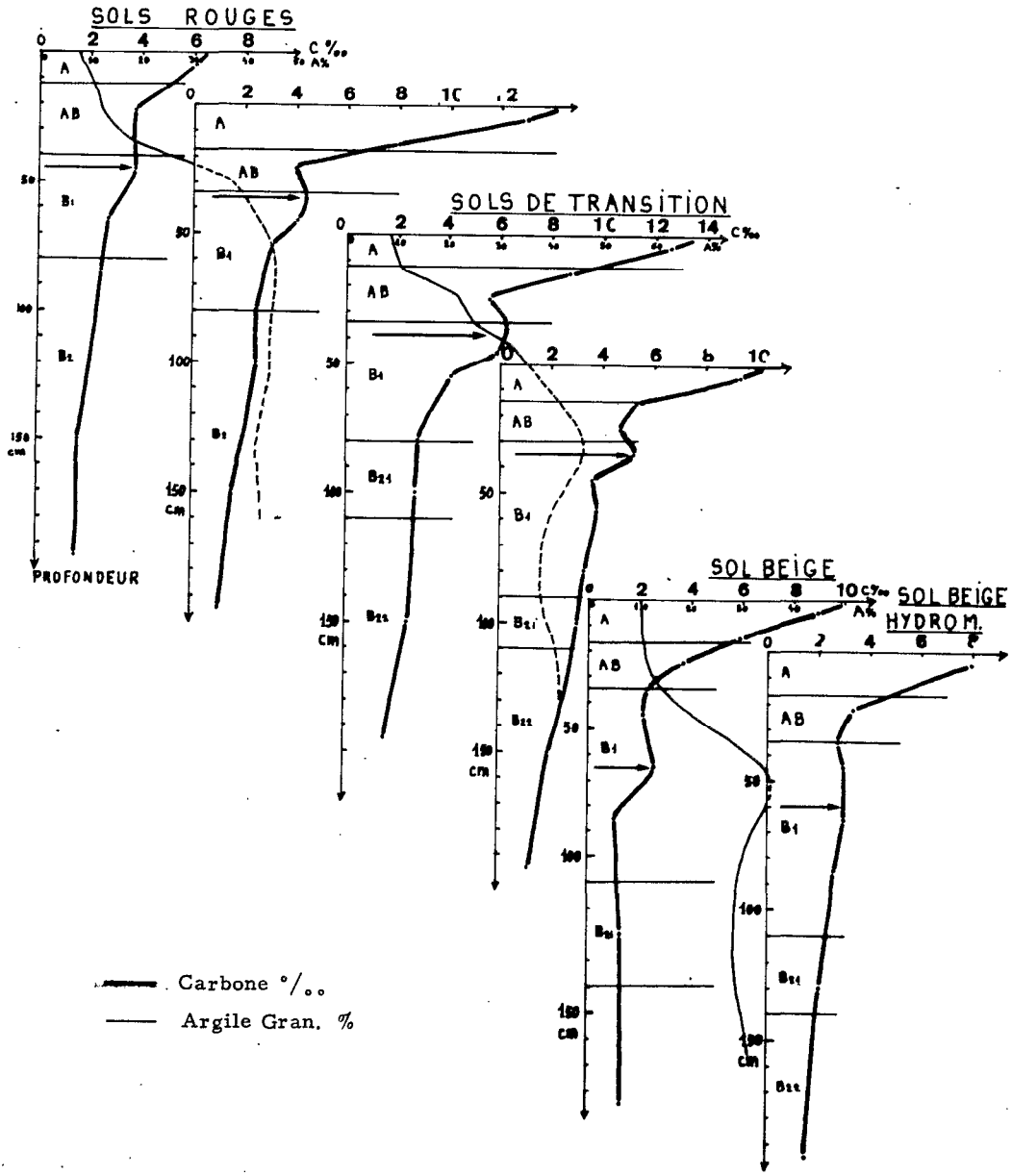


Fig. 7-4 - Variations verticales de la matière organique sous forêt (exprimées en carbone °/₀₀ de la terre fine).

- au sommet, dans le sol rouge, le profil organique peu contrasté, ne présente aucun minimum accentué, la décroissance progressive marque seulement un palier de 25 à 45 centimètres,

- plus à l'aval, la distribution de la matière organique indique une différenciation plus accentuée, marquée en particulier par le développement du 2me niveau (FAUCK, 1972) particulièrement bien individualisé dans le sol de transition,

- en bas de la toposéquence, ce deuxième niveau gagne en profondeur dans l'horizon B des sols beiges, puis s'estompe lorsque se développent les caractères d'hydromorphie.

Ces profils organiques sont en relation avec les caractères morphologiques.

- ainsi les alternances de teintes brunes, rouges et jaunes correspondent à l'accroissement du taux de carbone à la base de l'horizon AB du sol de transition,

- des revêtements argileux révèlent l'individualisation du 2me niveau d'accumulation organique,

- les textures les plus argileuses (appréciées sur le terrain) sont localisées dans la partie inférieure de la frange de pénétration organique,

- les "granules", "nodules" et "concrétions" se généralisent ou s'individualisent dans les horizons en-dessous des accumulations organiques.

La distribution verticale de la matière organique est également liée à celle de l'argile granulométrique. Sur la figure 7-4, les taux d'argile ont été portés en surcharge pour 3 profils caractéristiques de la toposéquence. Il apparaît qu'au deuxième niveau d'accumulation organique correspondaient, dans le sol rouge et le sol de transition,des points d'inflexion de la courbe de distribution de l'argile, dans le sol beige un maximum absolu de la teneur en argile.

b) Distributions verticales de la matière organique dans les sols cultivés (fig. 7-5).

Les teneurs en carbone, déjà faibles dans l'horizon superficiel (5 à 6 °/$_{oo}$), diminuent progressivement jusqu'à 20 - 35 centimètres, mar-

quent un palier jusqu'à 40 - 65 centimètres, puis se stabilisent entre 1 et 2 °/₀₀ dans les horizons plus profonds. A cette évolution due à la culture

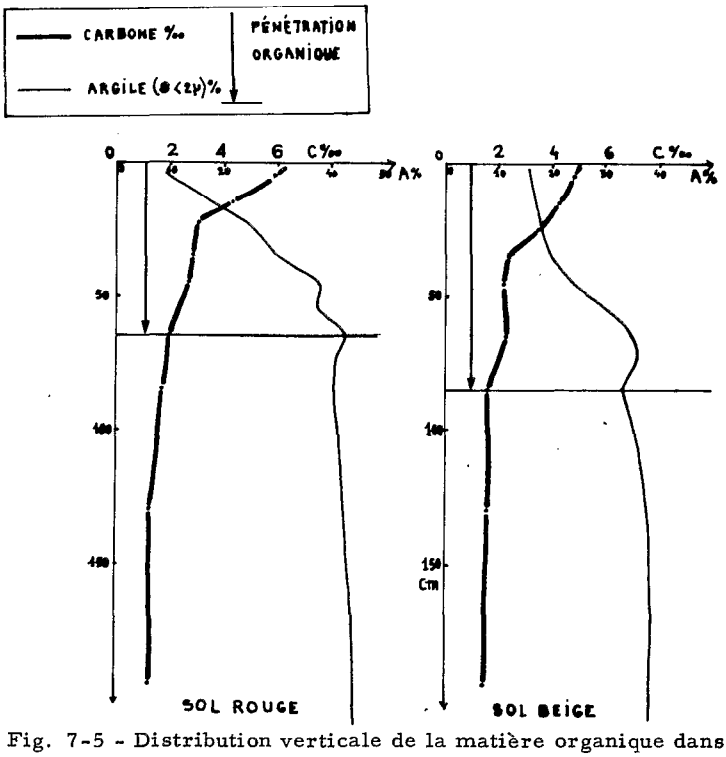


Fig. 7-5 - Distribution verticale de la matière organique dans les sols cultivés.

correspond un renforcement de la relation entre les variations verticales de la matière organique et celles de l'argile :

- dans le sol rouge des variations irrégulières de teneur en argile s'observent au niveau inférieur de pénétration organique,

- dans le beige, les niveaux d'accumulation organique et argileux coïncident.

c) Quantités totales de matière organique cumulées sur 2 mètres d'épaisseur. Elles ont été calculées en tenant compte des densités apparentes.

Les ordres de grandeur figurent sur le tableau 7-3.

On remarque :

- que ces valeurs sont un peu inférieures à celles obtenues

par HUMBEL (1974) sous savane et forêt claire du nord Cameroun (souvent supérieures à 20 kg/m^2),

- que les maximums s'observent au niveau des sols de transition, tandis que les sols beiges semblent être sensiblement moins pourvus en matière organique que les rouges,

- que la mise en culture se traduit par un abaissement sensible des réserves, d'autant plus important que le sol est à l'origine plus riche en matière organique.

Tableau 7-3.
QUANTITES DE MATIERE ORGANIQUE CUMULEES SUR 2 METRES D'EPAISSEUR (en kg/m^2).

COUVERT VEGET. / SOLS	FORET	CULTURE
ROUGE	16	11
TRANSITION	19	
BEIGE	12	10

Le renforcement de la relation entre les distributions verticales de la matière organique et celles de l'argile, consécutif à la mise en culture et donc à un appauvrissement relatif en carbone total, suggère une évolution différente des composés organiques selon qu'ils sont plus ou moins liés au support minéral.

2/ - Compositions et types de matière organique.

Les premières études détaillées de caractérisation de la matière organique des sols de Casamance (THOMANN, 1964) ont utilisé la méthode proposée par TIURIN (1962) permettant d'extraire 5 fractions humiques différentes. Les substances organiques non extraites étant désignées sous le nom d'humine.

Dans l'ordre de solubilisations successives, ces fractions humiques sont les suivantes :

- acides "fulviques libres" (extraits par SO_4H_2 0, 5 N), principalement constitués d'acides organiques (aliphatiques et phénoliques) parmi lesquels figurent les acides hydrosolubles mis en évidence dans les produits de décomposition des litières (YUNG et al., 1967),

- acides "fulviques liés aux acides humiques" (solubilisés par Na OH dilué), plus polymérisés et moins mobiles dans les sols,

- acides "humiques libres" (précipités en milieu acide à partir de la solution dans Na OH),

- acides "humiques gris", très polymérisés, liés aux argiles soit par les ions Ca^{++}, soit par les ions Fe^{+++} et Al^{+++}.

Les risques de transformation de la matière organique lors du traitement sont d'autant plus importants que les attaques sont plus agressives et répétées, aussi sont-ils moindres pour les premières fractions extraites, en particulier pour les acides fulviques libres. Or, ce sont précisément les données qui se rapportent à cette première fraction qui vont retenir notre attention.

a) Résultats relatifs à 4 profils de sols de Casamance (2 rouges et 2 beiges) Ils sont représentés sur la figure 7-6 (selon THOMANN, 1964).

L'examen de ces graphiques suggère quelques remarques :

- les acides humiques sont, dans l'ensemble, dominants dans tous les horizons A,

- les "acides humiques gris" sont plus abondemment représentés dans les sols beiges que dans les rouges (particulièrement en ce qui concerne les formes liées à l'argile par des ions Ca^{++}, pratiquement absentes des sols rouges),

- la prépondérance des acides fulviques caractérise les horizons AB et surtout B 1, elle est nettement plus accentuée et correspond à une distribution plus profonde dans les sols beiges que dans les rouges.

Ce dernier caractère surtout apparaît discriminant. Sur l'ensemble des sols étudiés en zone tropicale ouest-africaine (THOMANN, 1964), les plus fortes teneurs en acides fulviques "libres" et "liés aux acides humiques" sont relevées dans les sols beiges de Casamance (exprimées à C °/₀₀, 0,44 et 0,50 entre 40 et 60 centimètres de profondeur).

Apparemment faibles en valeur absolue, ces concentrations semblent être, à première vue, insuffisantes pour exercer une action importante sur la pédogénèse. Considérons toutefois qu'il s'agit de substances plus ou moins hydrosolubles dont les quantités peuvent être exprimées en fonction du volume de la solution du sol : ainsi à une teneur en acide fulvique de 0,5 °/₀₀ (exprimée en carbone) correspond une concentration de 2,5 grammes par litre, compte tenu d'une capacité au champ voisine de 20 %.

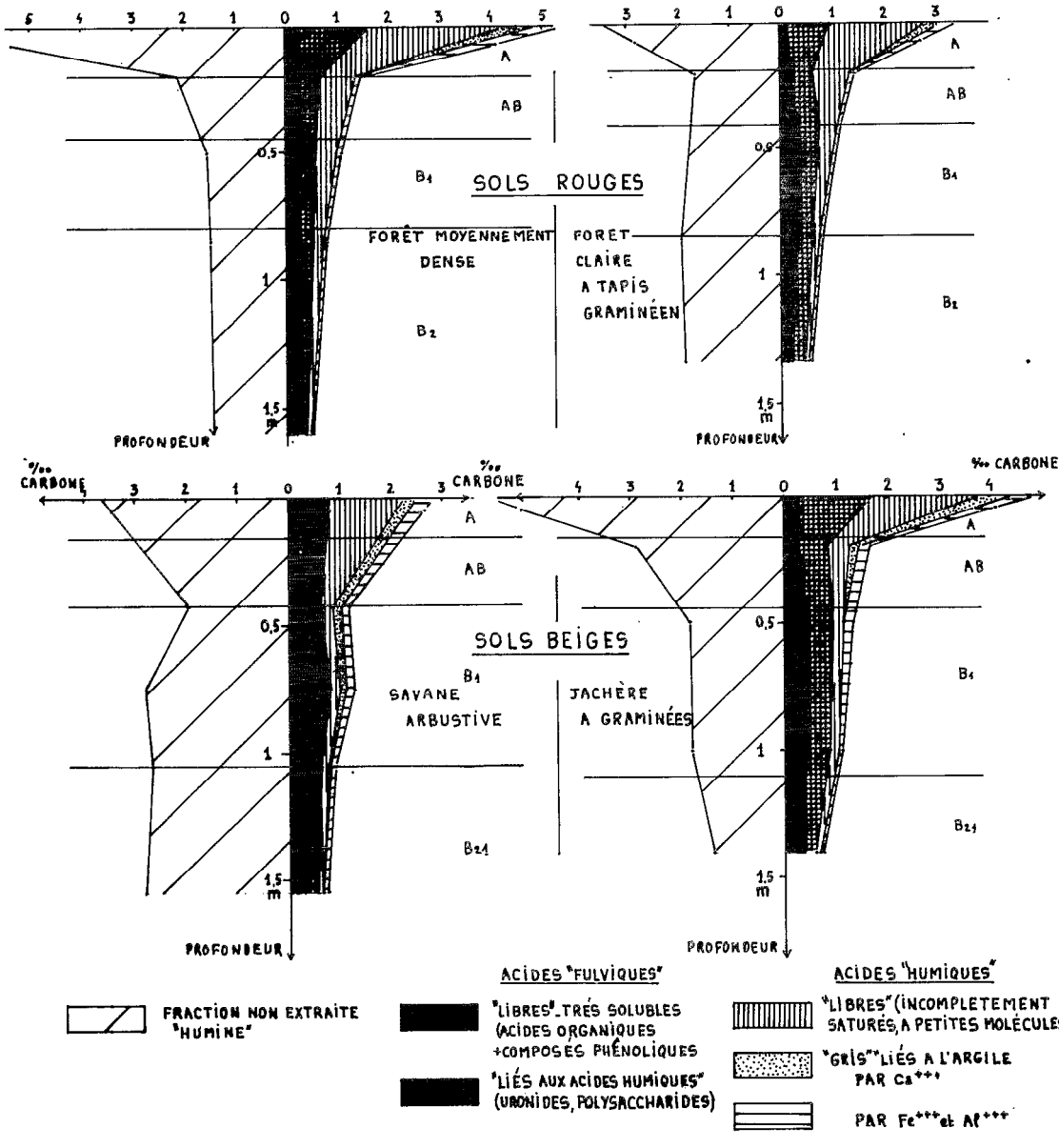


Fig. 7-6 - Répartition des différentes fractions organiques dans les profils selon THOMANN (1964) - méthode TIURIN (1962)

Les concentrations d'acides organiques hydrosolubles mises au contact des constituants minéraux dans l'horizon B 1, plus élevées dans les sols beiges que dans les rouges, sont donc loin d'être négligeables.

b) Evolution de la composition de la matière organique consécutive à la mise en culture des sols rouges.

Elle a été étudiée par Madame PERRAUD sur les échantillons de la séquence d'évolution des sols sous culture de SIBAND.

Il ressort de l'examen des résultats rassemblés dans le tableau 7-4, que si en 90 ans de culture, les taux de matière organique totale, à 40 - 50 centimètres de profondeur, semblent avoir diminué de 28 %, les teneurs en acide fulvique sont, à l'inverse, restées stables, les pertes portant essentiellement sur les acides humiques.

Il apparaît donc que, au sommet de l'horizon B 1, la prépondérance des "acides fulviques" tend à croître, dans les sols rouges, en fonction de l'ancienneté de la mise en culture.

Tableau 7-4.

CONCENTRATION DES DIFFERENTES FRACTIONS ORGANIQUES DANS LA SEQUENCE D'EVOLUTION DES SOLS ROUGES SOUS CULTURE DE 40 à 50 cm (PERRAUD, 1972)

Fractions / Ancienneté	C ‰ Total	C ‰ Hum. tot.	C ‰ Ac. Fulv.	C ‰ Ac. Hum.	$\frac{\text{C. Ac. Fulv.}}{\text{C. Total}} \times 100$
FORET	3,05	1,72	0,88	0,84	30
3 ans de culture	2,82	1,41	1,01	0,40	36
12 ans	2,30	1,25	0,85	0,40	37
48 ans	2,26	1,36	1,07	0,29	47
90 ans	2,21	1,31	0,99	0,32	45

3/ - Conclusions.

La principale caractéristique mise en évidence par l'étude de la matière organique contenue dans ces sols est l'importance des fractions les plus solubles et les moins polymérisées, rassemblées sous la dénomination d'"acides fulviques".

Exprimées en valeur absolue, ou mieux, par leur rapport au taux de matière organique totale, leurs teneurs semblent croître en passant :

- dans un même profil, des niveaux superficiels aux horizons *AB et parfois B 1*,
- dans la toposéquence, des sols rouges aux sols beiges,
- dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture, à 40 - 50 centimètres de profondeur, des sols sous forêt aux sols défrichés.

C - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU COMPLEXE ABSORBANT.

1/ - Capacité d'échange

On attribue aux colloïdes minéraux et organiques le rôle essentiel dans l'aptitude que possèdent les sols de retenir les ions à l'état échangeable.

Or, la détermination de l'argile granulométrique fournit une première évaluation, imparfaite, de la quantité de colloïdes argileux, tandis que les dosages de carbone indiquent les teneurs en "matière organique totale" contenue dans les sols. C'est donc en regard de ces deux ensembles de données, étudiés précédemment, qu'il convient d'examiner les mesures de la capacité d'échange, faites selon la méthode proposée par OLLAT et COMBEAU (1960) (chlorure de calcium, pH 7).

a) Résultats relatifs à 3 profils type de la toposéquence de sols sous forêt ("rouge", "de transition", et "beige").

Ils sont représentés sur la figure 7-7 (sur laquelle sont également portés en surcharge les taux d'argile et de matière organique).

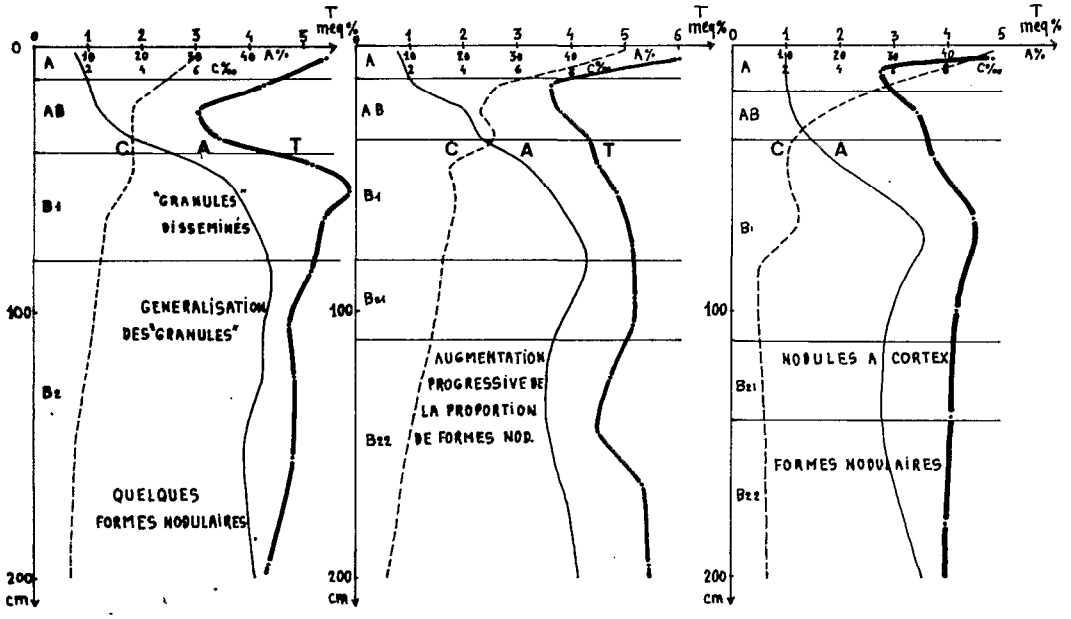


Fig. 7-7 - Variations verticales de la capacité d'échange (T), de l'argile gran. (A) et de la matière organique (C) (exprimée en carbone °/₀₀) sous forêt.

Les caractères communs à ces sols sont les suivants :

- les valeurs de la capacité d'échange sont toutes relativement faibles, comprises pour la plupart entre 2 et 5 milliéquivalents pour 100 grammes,

- aucune différence d'ordre de grandeur n'apparaît entre sol rouge et sol beige(ceci est à mettre en relation avec la présence exclusive de kaolinite, minéral argileux à faible capacité d'échange),

- tous les profils présentent deux valeurs maximales : la première dans l'horizon humifère, la seconde dans l'horizon B I. Ces variations verticales révèlent les influences conjuguées de la matière organique et de l'argile.

Les particularités portent sur les variations verticales de la capacité d'échange, en relation avec celles de l'argile et de la matière organique.

- Dans le sol rouge, le maximum de capacité d'échange de l'horizon B 1, très marqué, est nettement décalé par rapport au maximum d'argile granulométrique (comme l'était d'ailleurs le niveau présentant la

texture la plus argileuse). De même le minimum de l'horizon B 2 ne semble pas pouvoir s'expliquer par la simple addition des capacités d'échange de l'argile et de la matière organique.

- Dans le sol de transition et le sol beige, à l'inverse, les variations de la capacité d'échange correspondent mieux à celles de l'argile (rappelant encore, en cela, la relation avec les variations verticales d'impression de texture).

- Les différences sont peu marquées entre le profil de sol de transition et celui de sol beige. Les transformations affectant la capacité d'échange se situent donc entre le sol rouge et le sol de transition.

Il est, de ce fait, intéressant d'étudier les variations de la capacité d'échange dans les sols rouges dont les caractères morphologiques sont intergrades avec ceux du sol de transition.

b) Résultats relatifs à 3 profils de sol rouge intergrades avec le sol de transition (sous forêt et sous culture (fig. 7-8).

Le premier de ces profils est le seul à présenter (comme tous les sols observés sous forêt) un maximum de capacité d'échange au niveau de l'horizon humifère (qui disparaît presque totalement dans les sols cultivés depuis longtemps). Son caractère commun avec les deux autres profils est le dédoublement du deuxième maximum dans l'horizon B 2, formant deux crochets décalés par rapport à ceux que présente la variation verticale du taux d'argile.

Dans le deuxième profil, (cultivé depuis près d'un siècle), ces deux accidents, situés à des profondeurs comparables (45 et 75 cm) correspondent, l'un au second niveau d'accumulation organique, l'autre à la texture la plus argileuse décelée sur le terrain (au-dessus du maximum d'argile granulométrique).

Dans le troisième, enfin, (également cultivé depuis près d'un siècle mais présentant des contrastes de couleur), ces variations verticales tendent à s'estomper tandis que deux crochets se distinguent à leurs niveaux dans la distribution verticale de l'argile granulométrique.

Tout semble donc se passer ici comme si les variations verticales de la capacité d'échange précédaient celles de l'argile.

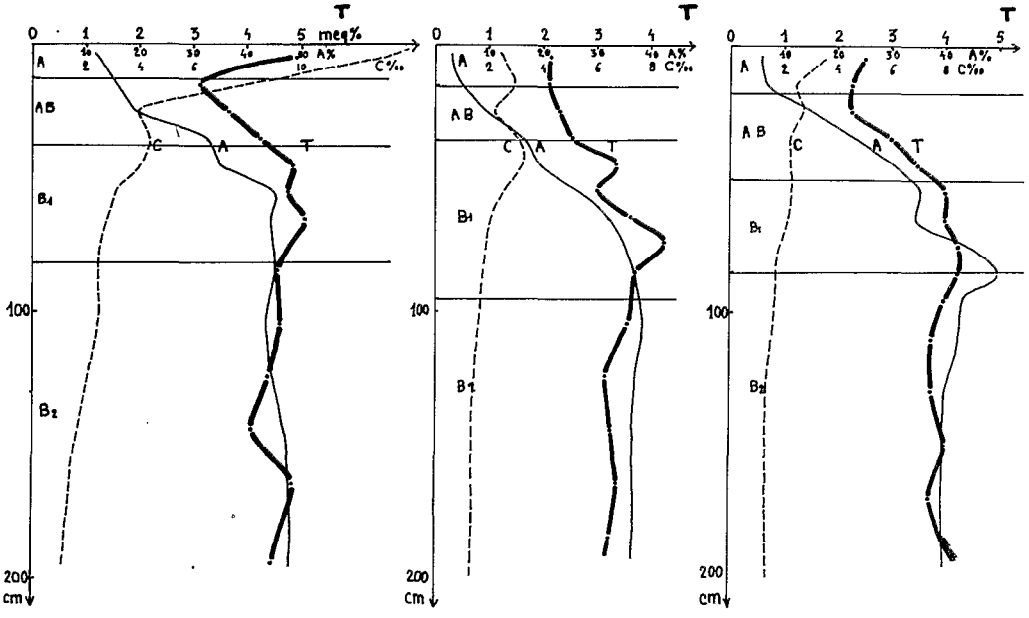


Fig. 7-8- Variations verticales de la capacité d'échange (T), de l'argile gran. (A) et de la matière organique (C) dans des sols rouges
- sous forêt à horizon AB brun-rouge
- ou cultivés depuis près d'un siècle.

c) Interprétation.

. Action et interaction des constituants minéraux et organiques sur la capacité d'échange.

Les calculs de corrélation effectués par OLLAT et COMBEAU (1960), sur les horizons superficiels de sols dont les fractions argileuses sont également kaolinitiques, donnent des expressions dont la forme est : $y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + c$ (où y est la capacité d'échange, x_1 le taux d'argile et x_2 la teneur en carbone. On constate cependant que le coefficient affectant x_1 (argile) augmente de 60 % (de 0,079 à 0,129) en passant des sols "ferrallitiques de Grimari" aux sols "beiges de Guinée", tandis que celui relatif à x_2 (carbone) diminue de près de 50 % (de 5,434 à 3,007), et que le facteur constant c (qui pourrait exprimer le résultat d'une interaction entre argile et matière organique) varie dans de très larges proportions (de 0,02 à 2,74).

. Même dans des sols dont l'argile est de même nature (kaolinite) il peut ainsi apparaître de larges différences de capacité d'échange rappor-

tée aux taux de colloïdes minéraux et organiques. De plus, les possibilités d'interaction (à effet positif ou négatif) entre ces deux constituants risquent, dans certains cas, de jouer un rôle déterminant sur le comportement global du sol vis-à-vis des échanges ioniques.

Hors des horizons humifères, il est vraisemblable que des différences du même ordre peuvent apparaître entre des matériaux soumis à des conditions d'évolution diverses et mis en présence de concentrations inégales de composés organiques plus ou moins polymérisés. Selon les travaux de SCHOFIELD (1946), les composés du fer et de l'aluminium pourraient interférer également sur les propriétés ioniques du sol par la formation de polymères chargés non échangeables, capables de bloquer des positions d'échange.

L'existence de fortes variations de la capacité d'échange dans les horizons B de sol rouge, qui ne peuvent être expliquées par la simple addition des capacités d'échange de la matière organique et de l'argile, semble résulter de telles interactions (positives ou négatives).

Signification dynamique de la capacité d'échange.

Il convient de préciser que la capacité d'échange doit être considérée non seulement sous son aspect chimique classique, mais aussi comme un paramètre mesurant, en quelque sorte, les forces ioniques entre les particules, c'est-à-dire celles qui agissent à la fois sur la dissociation préalable à la dispersion, et sur la recombinaison lors de la prise en masse consécutive à l'évaporation (MERING, 1964).

Il n'est donc pas surprenant de constater que toute variation de la capacité d'échange entraîne des modifications dans le développement des forces ioniques entre particules et donc dans les possibilités de redistribution des constituants argileux dans le profil.

Il se pourrait ainsi que dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture, des variations de capacité d'échange précèdent effectivement les modifications du profil textural ou interfèrent avec elles.

2/ - pH.

La réaction du sol est une notion complexe et le pH ne donne, à ce sujet, qu'une indication de l'activité des ions H^+ dans le système sol-eau

ou sol-solution saline, compte tenu de toutes les réserves que peut comporter cette détermination, tant sur le plan théorique que sur le plan technique (BLANCHET et al., 1960). Or, cette activité est dépendante, à la fois de l'état des surfaces et de la garniture ionique des particules qui constituent le complexe argilo-humique, et de la présence de substances dissoutes dans la solution du sol (en particulier, d'acides organiques).

Les mesures effectuées sur une suspension de sol dans du chlorure de potassium N indiqueraient l'acidité actuelle augmentée d'une partie de l'acidité d'échange et rendraient mieux compte de l'acidité présente à la surface des micelles. Un écart important ($>$ 1 unité) entre les pH mesurés dans l'eau et dans le chlorure de potassium N révèlerait ainsi la présence d'ions Al échangeables (GILLY, 1958). Il est à noter également que les mesures faites dans la solution de chlorure de potassium sont plus stables que celles obtenues dans l'eau. C'est pourquoi nous leur accorderons une particulière attention.

Une difficulté d'interprétation des valeurs du pH tient en effet à leurs variations dans le temps, nettement marquées en ce qui concerne les sols de moyenne Casamance. C'est ainsi que COINTEPAS (1960) signale à Séfa des fluctuations saisonnières du pH, qui diminue de plus de 0, 5 unité en saison des pluies et remonte en novembre lorsque les pluies cessent. De tels écarts rendent impossible la comparaison entre échantillons prélevés en différentes saisons. Aussi, nous limiterons-nous aux mesures effectuées au même moment (fin de saison sèche) dans les toposéquences de Salikénié.

a) Variations verticales des pH dans les profils types de la toposéquence de Salikenié.

Elles sont représentées sur la figure 7-9.

On remarque que, dans tous les profils :

- tous les pH sont acides, parfois très acides
- les pH les plus élevés (pH H_2O entre 5, 5 et 6) sont relevés dans l'horizon A,
- les variations verticales de pH présentent un minimum correspondant au deuxième niveau d'accumulation organique (horizon AB et sommet de B 1) dont la présence pourrait être liée à la concentration

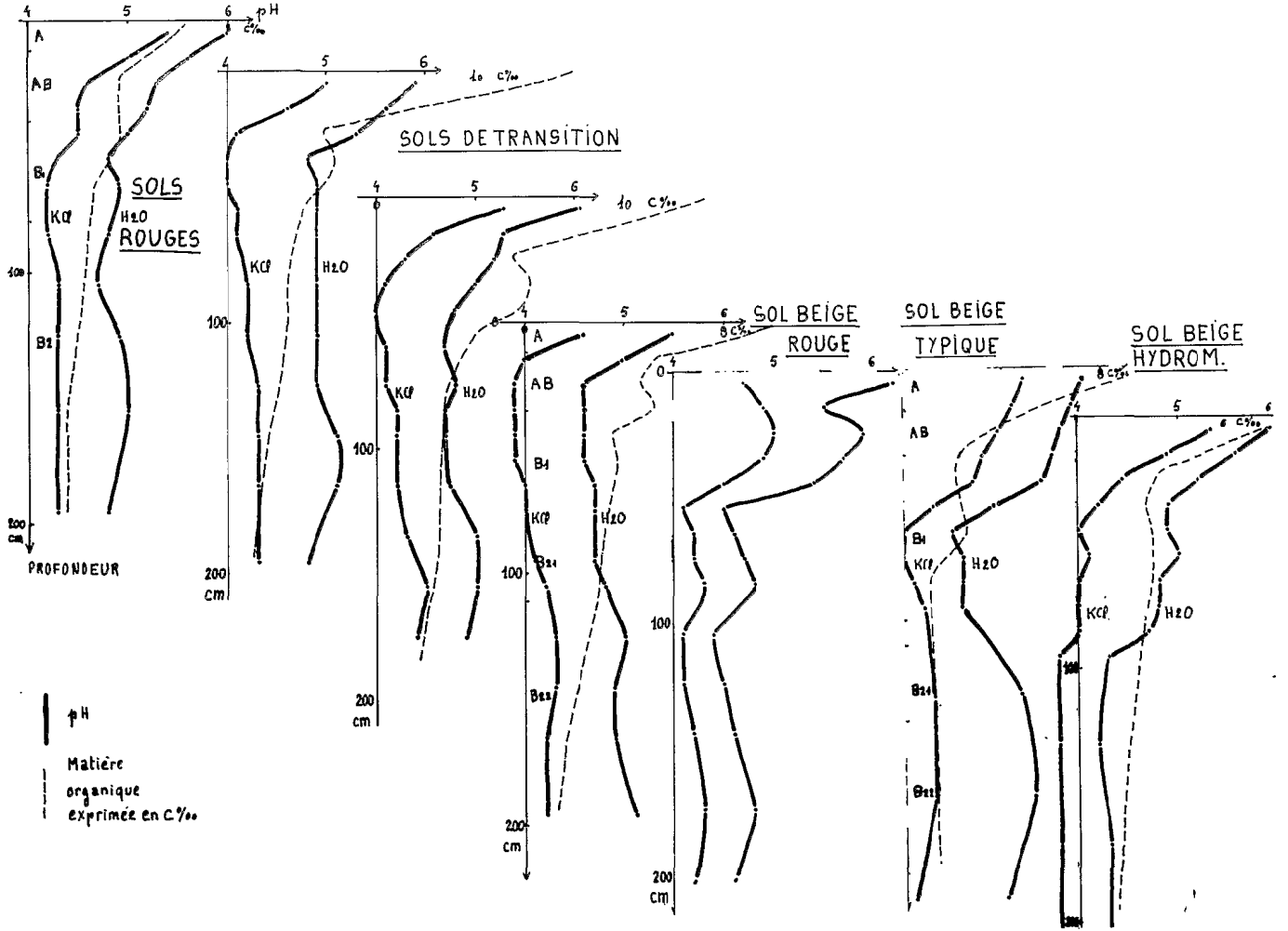


Fig. 7-9 - Variations verticales des pH (H_2O et K Cl) et de la matière organique (exprimée en carbone °/₀₀ sous forêt.

d'acides fulviques qui y est décelée,

- les pH tendent à augmenter au niveau de l'horizon B 2 (particulièrement le pH H_2O).

Cette variation verticale s'atténue au point de s'annuler dans le sol beige hydromorphe.

L'évolution des pH en allant des sols rouges aux sols beiges se manifeste, en particulier par des variations verticales évoquant des profils de plus en plus différenciés.

b) Variations latérales du pH KCl dans la toposéquence de Salikenié.

La représentation faite sur la figure 7-10 met en évidence la similitude de pH entre les sols beiges et rouges (signalée par MAIGNIEN 1961 et par FAUCK, 1963). Seul l'écartement des courbes isovaleurs révèle

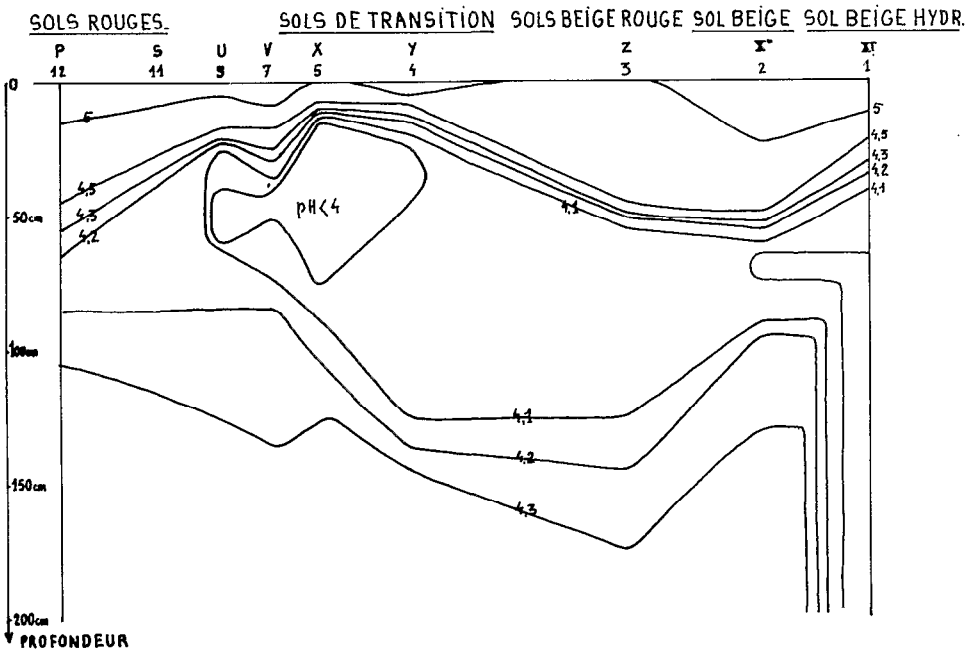


Fig. 7-10 - Variations latérales du pH (K Cl) dans la toposéquence de Salikenié.

des variations plus rapides dans les premiers que dans les seconds.

Entre ces deux ensembles de sols comparables, des pH nettement plus acides caractérisent les sols de transition.

On est conduit à s'interroger sur les transformations physico-chimiques, dont ces faibles pH pourraient être l'indice.

Bien que présentant un aspect sensiblement différent, les variations latérales du pH dans la toposéquence de Kounkali (fig 7-11) rappellent celles qui ont été mises en évidence à Salikenié. On y retrouve en particulier des différences relativement faibles entre sols beiges et rouges, mais

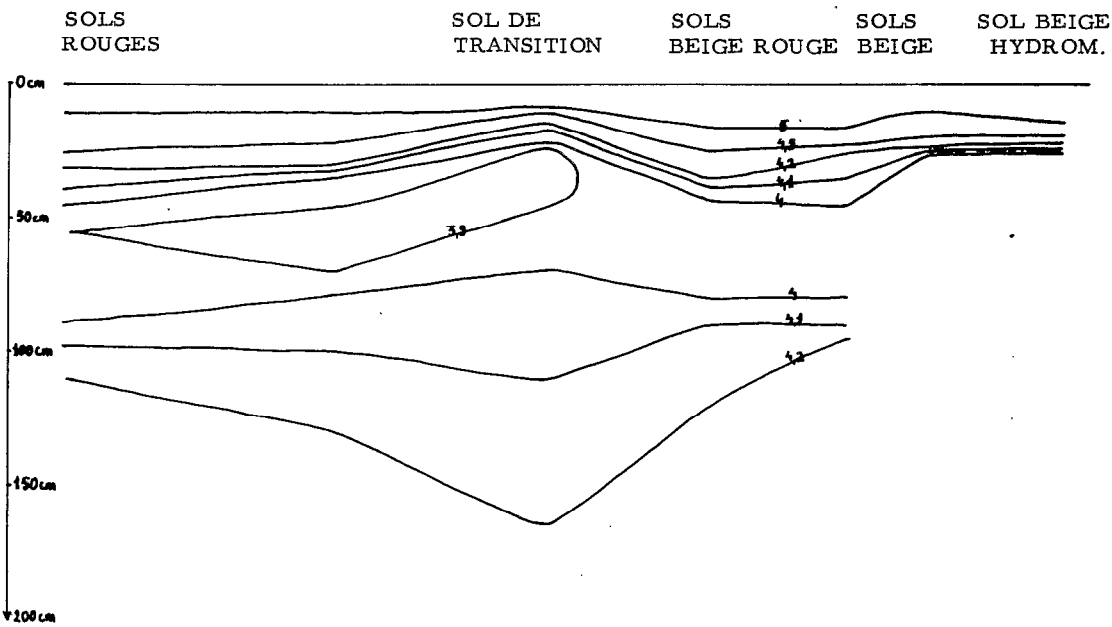


Fig. 7-11 - Variations latérales du pH K Cl dans la toposéquence de Kounkali.

une transition marquée par de très faibles valeurs du pH (pH K Cl $< 3,9$).

Des variations assez comparables apparaissent également dans la toposéquence étudiée par TOBIAS (1965) à Séfa. Il semble cependant que la mise en culture des parcelles de la S.O.D.A.I.C.A. ait entraîné de fortes perturbations du pH.

c) Variations du pH K Cl en fonction de l'ancienneté de la mise en culture (séquence d'évolution des sols rouges).

Représentées sur la figure 7-12, ces variations consistent essentiellement :

- en une diminution sensible et rapide du pH de l'horizon

humifère (qui passe de 5, 5 à 5 en quelques années),

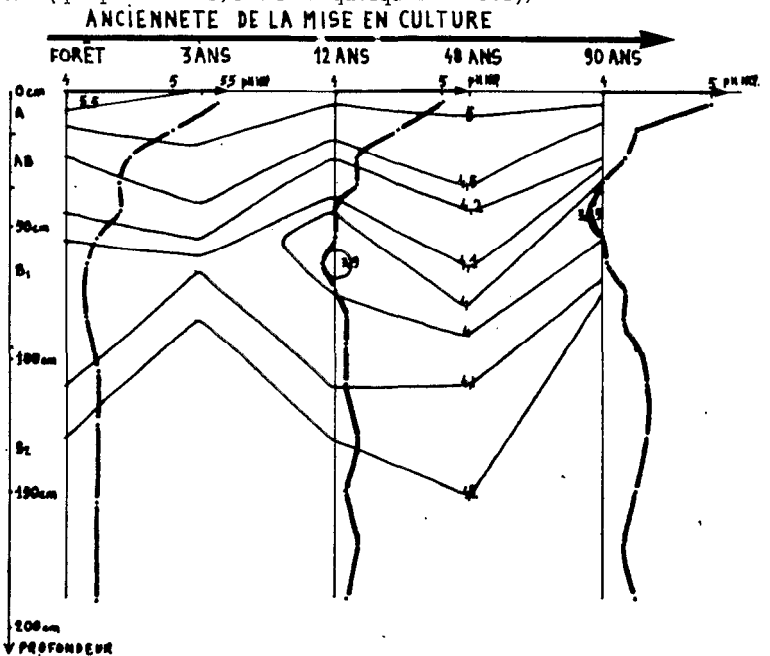


Fig. 7-12 - Variation des pH K Cl dans la séquence de transformation des sols rouges sous culture.

- en une diminution plus lente du pH de l'horizon B 1 (sa valeur atteint 3, 9 après 12 ans de culture).

L'allure générale des courbes isovaleurs (en fonction du temps), rappelle celle des courbes caractéristiques des toposéquences, sans qu'il soit possible, pour l'instant, d'envisager la signification d'une telle analogie.

L'interprétation de toutes les variations du pH décelées dans l'espace (verticalement et latéralement) et dans le temps (en fonction de l'ancienneté de la mise en culture) reste très incertaine. La convergence qui apparaît entre les différentes toposéquences et séquence de sols cultivés, permet cependant de considérer la réaction très acide qui caractérise le sol de transition comme étant l'indice d'une transformation physico-chimique localisée dont il conviendra d'étudier la nature.

3/ - Bases échangeables.

Les déterminations les plus usuelles, faites par les laboratoires des sols, portent sur les ions Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}, Na^{+}.

Il est habituellement admis que leur énergie de fixation décroît selon l'ordre correspondant à cette énumération.

a) Variations verticales des teneurs en cations échangeables (exprimées en milliéquivalents pour 100 grammes de terre fine) dans la toposéquence de Salikenié.

Elles sont représentées sur la figure 7-13.

La très faible abondance des ions Na^+ ($<0,2$ meq/100 g), telle que leur valeur n'a pas pu être figurée, et la rareté des ions K^+ apparaissent comme des indices, à la fois de la dominance des phénomènes de lixiviation et de la rareté des minéraux altérables susceptibles de libérer ces ions.

Les deux cations qui constituent l'essentiel des bases échangeables dans tous les profils sont donc Ca^{++} et Mg^{++}. Leurs quantités ont généralement le même ordre de grandeur, le plus souvent compris entre 0,2 et 0,3 milliéquivalents/100 grammes (valeurs à peine inférieures à celles obtenues par analyse totale, ce qui confirme encore la rareté des minéraux altérables). Les ions Ca^{++} sont dominants dans tous les horizons A et parfois AB ainsi que dans l'horizon B 1 des sols beige rouge et beige hydromorphe ; les ions Mg^{++} le sont dans tous les autres horizons, particulièrement dans les horizons B 1 et B 2 des sols rouges et des sols de transition. Il ne semble pas toutefois que les différences soient suffisantes pour qu'elles puissent donner lieu à une interprétation.

b) Equilibre des bases dans la séquence d'évolution des sols rouges cultivés.

Il tend, dans certains profils à se modifier dans le sens d'une prépondérance accrue des ions Ca^{++} (figure 7-14). Cette évolution aboutit, en 90 ans, au profil K S R dans lequel Ca^{++} est dominant sur l'ensemble du profil (considéré de 0 à 2 mètres), très nettement de 0 à 70 centimètres, de façon moins marquée dans les horizons plus profonds. Le crochet de la courbe de variation verticale de Mg^{++} qui marque la séparation entre ces deux domaines est situé immédiatement au-dessus de l'horizon B 1 à texture très argileuse (marqué par une flèche) susceptible de limiter les possibilités de drainage vertical. La modification de l'équilibre entre Ca^{++} et Mg^{++} pourrait donc être, dans ce cas, dépendante des variations du régime hydrique.

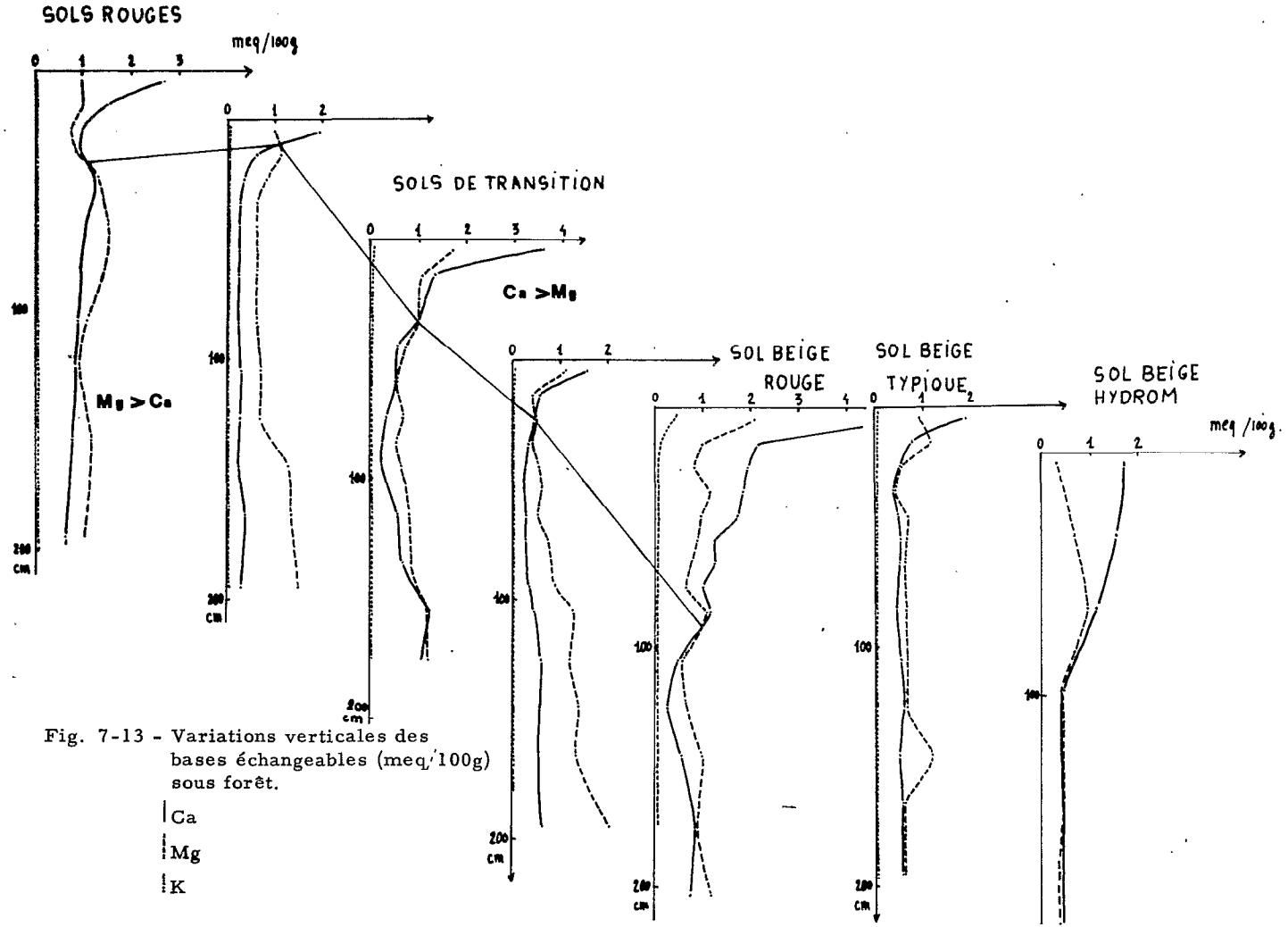


Fig. 7-13 - Variations verticales des bases échangeables (meq/100g) sous forêt.

| Ca
¦ Mg
¦ K

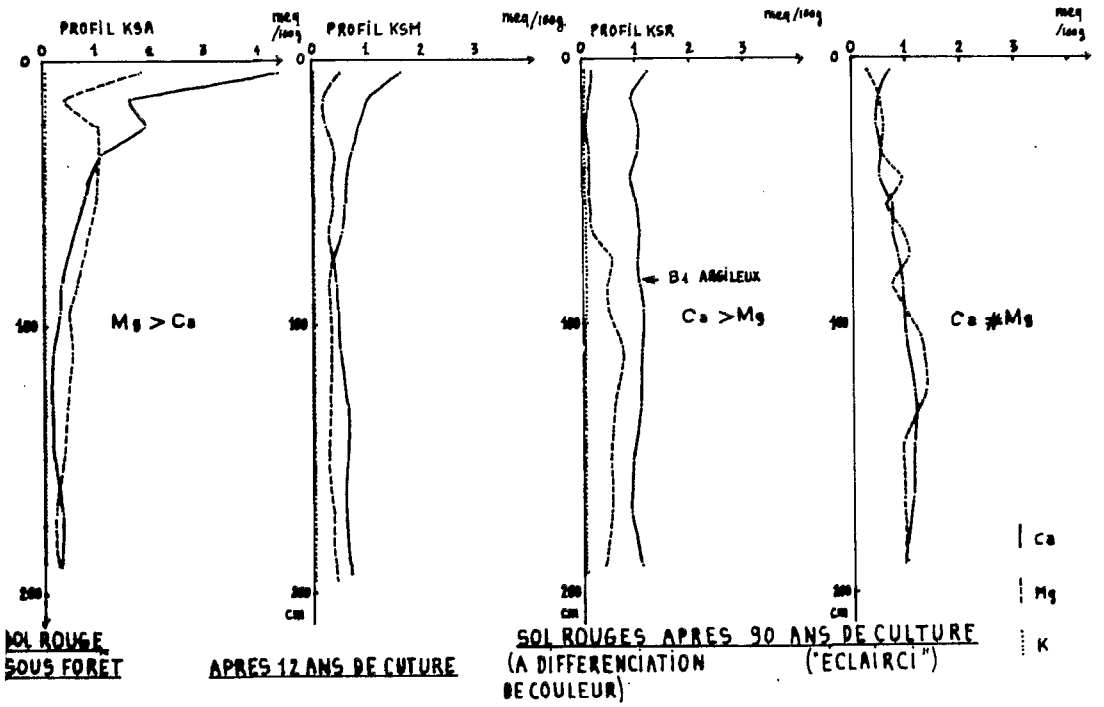


Fig. 7-14 - Variations verticales des bases échangeables sous culture.

Une autre évolution de l'équilibre des bases se manifeste dans le sol rouge "éclairci" qui, après 90 années de culture, ne présente pas de caractères de différenciation nettement marqués : on y observe en effet des fluctuations des teneurs en Mg^{++} de part et d'autre de celles de Ca^{++}. Cette évolution de l'équilibre Ca^{++}, Mg^{++} se manifeste dans les sols rouges qui ne présentent pas de limitation apparente de drainage vertical (et donc pas de manifestations d'engorgement) après leur mise en culture.

L'équilibre des bases serait donc dépendant du régime hydrique des sols dont l'étude sera abordée dans le prochaine chapitre.

4/ - Conclusions.

Les données relatives au complexe absorbant semblent être l'expression de deux caractéristiques fondamentales des sols étudiés :

- la simplicité de la constitution minéralogique qui impose ses limites (faible capacité d'échange, absence de libération d'ions par altération) et fait de ces sols des matériaux "modèle",

- la complexité des transformation qui semblent s'y produire (dans l'espace et dans le temps) ; de nature essentiellement physico-chimique, mettant en cause des interactions entre la kaolinite, les composés du fer et la matière organique ; étroitement liées à la dynamique actuelle de ces sols et à leur évolution pédogénétique.

Chapitre 8

CARACTÉRISTIQUES POROSIMÉTRIQUES ET FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DES SOLS

L'objectif n'est plus ici de caractériser les constituants du sol, mais les espaces laissés libres entre eux, qui résultent de leur assemblage initial et sont modifiés par les processus de différenciation pédologique.

Ces vides servent de voies de circulation et de réservoirs aux fluides. La connaissance de leur volume et de leur distribution dans le profil est donc un préalable nécessaire à l'étude du fonctionnement hydrique des sols.

L'évolution du système formé par la matière solide et par les vides dépend des fractions, de leurs volumes respectifs occupés :

- par le squelette et par la fraction argileuse,
- par l'eau, de façon permanente, fréquente ou exceptionnelle.

L'étude de la dynamique actuelle fait, quant à elle, appel à des mesures répétées de l'humidité dans différents profils. Leur interprétation sera faite en terme de bilan global, puis d'analyse plus détaillée des variations observées dans le temps et dans l'espace.

Afin de comprendre les faits observés, il est apparu utile d'isoler des volumes de terre (correspondants à différents horizons) de l'environnement dans lequel ils se trouvaient au sein du profil et de les soumettre à des conditions de percolation définies afin de préciser leurs caractéristiques intrinsèques.

L'étude comportera donc 4 parties :

A - caractéristiques porosimétriques

B - composition volumique et ses variations

C - bilan et régime hydrique

D - essai de comportement des matériaux soumis à l'action de l'eau (méthode VERGIERE).

A - CARACTERISTIQUES POROSIMETRIQUES.

Déduites des mesures de densité apparente (et de densité réelle), les porosités calculées sont des variables de position et des variables dimensionnelles. Il convient donc que l'échelle des prélèvements tienne compte de celle des hétérogénéités observées, soit pour en éliminer l'effet, soit au contraire pour en déterminer la maille en combinant les résultats fournis à différentes échelles de mesure (MONNIER, STENGEL, FIES, 1973).

Ces paramètres de la porosité sont également des variables saisonnières qui se modifient en fonction des variations de l'humidité du sol, responsable des phénomènes de gonflement (AUDRY et al, 1973). Ne pourront donc être comparées, de façon rigoureuse, que les mesures faites au même état d'humidité.

1/ - Méthodes utilisées.

Les mesures de densité réelle (et pseudoréelle) ont été répétées de nombreuses fois à l'aide du pycnomètre à eau (et du pycnomètre à air) sur quelques échantillons typiques et sur les fractions granulométriques (squelette et argile) qui en étaient extraites.

Des estimations théoriques, basées sur la composition minéralogique des matériaux (quartz, kaolinite, oxy-hydrates de fer), fournissent des résultats sensiblement supérieurs (à ceux obtenus par la mesure), particulièrement en présence de matière organique (même en quantité très faible) qui gêne la mise en volume et s'oppose au dégazage de l'échantillon.

Les valeurs adoptées tiennent compte des mesures et sont corrigées en fonction des estimations théoriques. Le faible écart qui existe entre

les densités réelles des deux principaux constituants (quartz : 2,65, kaolinite : 2,67) explique leur faible variation dans le profil.

Les mesures de densité apparente ont été faites sur un grand nombre de prélèvements, effectués à un instant donné à chaque niveau d'une coupe, puis dans des tranchées situées à quelques mètres de distance les unes des autres, dans des profils analogues éloignés de plusieurs kilomètres, et enfin aux mêmes emplacements en différentes périodes de l'année climatique. Au total, plus de 1000 mesures ont été ainsi faites.

Les volumes des échantillons sont déterminés, soit à l'humidité que présentait le sol en place à l'instant considéré, soit encore après que celui-ci ait été séché à l'air :

- dans le premier cas, la méthode employée est celle du cylindre : des cylindres de 100 cm^3 sont enfoncés verticalement dans le sol en place au fur et à mesure du creusement d'une tranchée par marches successives, ils sont alors arasés à leurs extrémités de part et d'autre, les volumes de terre ainsi prélevés sont immédiatement placés dans des sacs plastiques étanches, puis pesés à l'état humide, séchés à l'étuve jusqu'à poids constant et pesés à nouveau pour déterminer le poids sec et, par différence, l'humidité volumique (4 à 10 prélèvements étant effectués à chaque niveau). Les sols étudiés, suffisamment rigides et presque dépourvus d'éléments fortement indurés se prêtent bien à ce type de mesure tant que leur humidité reste voisine de la capacité au champ,

- dans le deuxième cas, les échantillons étudiés sont des cubes, destinés aux mesures de perméabilité (méthode VERGIERE, travail fait en collaboration avec TOBIAS, 1968), ou des agrégats obtenus par forçage à la main de la terre séchée à travers un tamis à mailles carrées de 3 mm.

. Les cubes de 1 dm^3, découpés à la scie dans une boîte à coupe à partir de monolithes débités sur le terrain en plaques d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur et séchés à l'air libre, sont pesés au laboratoire (une correction étant faite pour tenir compte de leur humidité résiduelle déterminée après passage à l'étuve à 105°).

. Les agrégats (de 2 à 3 millimètres de diamètre) sont également pesés à l'état sec puis soumis à des mesures de volume apparent

par pesée hydrostatique dans du pétrole après immersion préalable dans ce même liquide durant 24 heures, de façon à obtenir un taux de remplissage stable de la porosité (MONNIER, STENGEL et FIES, 1973).

. Trois échelles de prélèvement sont ainsi utilisées : décimétrique (cube), centimétrique (cylindre) et millimétrique (agrégats).

. Seules les mesures faites par prélèvement au cylindre, portent sur des volumes déterminés à l'état d'humidité réelle du sol, ce sont donc elles qui constituent ici les données de référence.

2/ - Résultats.

a) Mesures faites par prélèvement au cylindre (échelle centimétrique)

Les porosités obtenues sont représentées graphiquement sur la fig. 8-1.

Il ressort de l'examen de ce graphique :

- que les profils typiques de sol rouge et de sol beige, sous végétation forestière conservée, sont caractérisés par des variations verticales de la porosité, sur 2 mètres de profondeur (de bas en haut) :

. faibles dans les premiers (de 45,7 à 49,7 %) :
diminution à peine perceptible dans la partie supérieure de l'horizon B 2 (48 %), plus sensible dans l'horizon B 1 (45,7 %),
très faible augmentation relative à proximité de la surface (46,3 %).

. de plus grande amplitude dans les seconds (40 à 60 %) en relation avec la différenciation en horizons :
fluctuations de 42,5 à 47 % dans les horizons B 22 et B 21
minimum dans l'horizon B 1 (39,5 %)
points d'inflexion et maximum superficiel (60 %) dans les horizons AB et A.

- que les sols qui marquent la transition entre les précédents (tant par leur position dans la toposéquence que par leurs caractéristiques morphologiques propres) présentent des distributions verticales de la porosité qui se modifient latéralement, du sol rouge au sol beige :

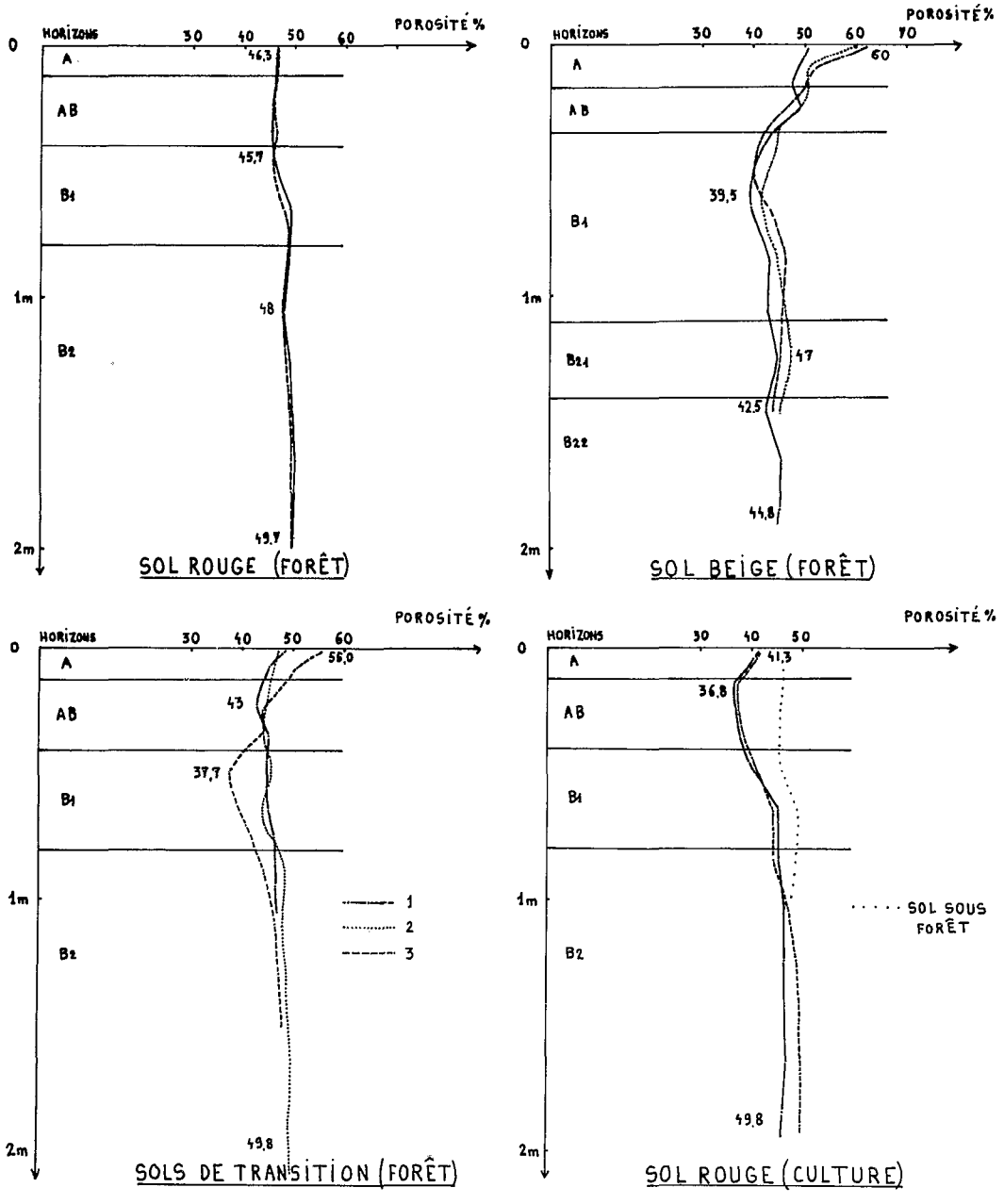


Fig. 8-1 - Porosités déterminées dans des profils de sol rouge, beige et de transition sous forêt, ainsi que dans des profils de sol rouge cultivé.

. développement d'un minimum (43 %) limité à l'horizon AB, là où ce dernier se colore de rouge brun tandis que se renforce le maximum dans l'horizon superficiel (courbe 1, profil 9 de la toposéquence)

. fluctuations irrégulières dans l'ensemble des horizons B 1 et AB nuancés de jaune brun (courbe 2 profil 7)

. accentuation du minimum (37,7 %) dans l'horizon B 1, jaune rouge, du sol de transition sensu stricto, là où apparaît le point d'inflexion dans l'horizon AB, et où augmente le maximum superficiel (55 %) (courbe 3, profil 6).

- que les sols rouges modifiés par l'effet de la culture (il s'agit ici de sols de la station de Séfa) sont caractérisés par :

. un minimum de porosité accentué (36,8 %) qui affecte l'ensemble de l'horizon B 1 (par comparaison au sol maintenu sous forêt)

. un maximum relatif superficiel (41 %, inférieur à la porosité du même horizon sous forêt).

Des résultats comparables (bien que plus irréguliers) sont obtenus dans les sols rouges cultivés de façon traditionnelle dont la coloration est nuancée de jaune.

Les sols maintenus sous végétation forestière présentent donc des profils de porosité qui varient selon leur place dans la toposéquence et selon leurs caractères de différenciation : peu accentuée dans le sol rouge typique, contrastée dans le beige (minimum en B 1, maximum en A), marquée entre les deux par des variations latérales progressives qui aboutissent au niveau du sol de transition sensu stricto, aux plus faibles porosités décelées dans l'ensemble de la toposéquence (dans l'horizon B 1).

Les sols rouges modifiés par l'effet de la culture (cf. chap. 2) sont, pour leur part, affectés par une diminution de la porosité (minimum accentué dans l'horizon AB) qui atteint une profondeur très supérieure à celle de la couche de sol travaillée par les outils ; elle ne peut être expli-

quée par le seul effet de tassement dû au travail mécanique (puisqu'elle se produit également en culture traditionnelle) et résulte donc de la transformation des conditions d'évolution du sol.

Dans les sols de transition comme dans les sols rouges cultivés enfin, la différenciation du minimum de porosité dans les horizons B 1 et AB s'accompagne toujours du développement d'un maximum superficiel ; ce qui a pour effet d'accroître les contrastes du profil de porosité.

b) Comparaison avec les mesures faites sur les agrégats (2 à 3 mm) et sur les cubes (arête : 1 dm).

Les résultats obtenus pour un profil de sol rouge (à nuances jaunes) et un profil de sol beige, tous deux situés sous forêt, sont reportés graphiquement sur la fig. 8-2

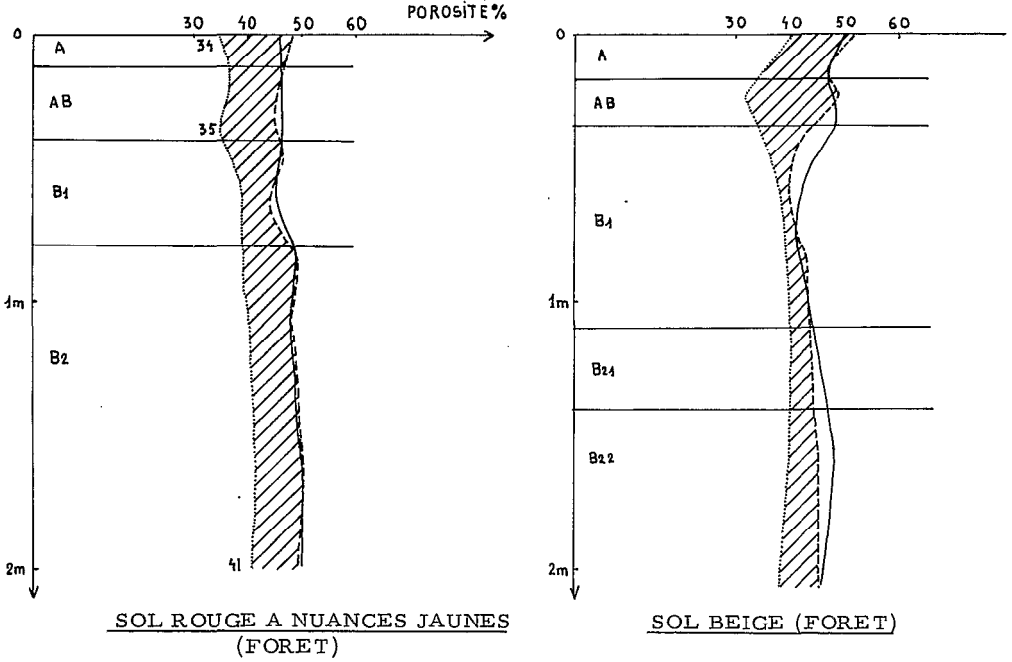


Fig. 8-2 - Porosité des prélèvements millimétriques ·····
centimétriques -----
décimétriques ——

Porosité "structurale" de maille comprise entre 2 - 3 mm et 5 cm

Plusieurs constatations ressortent de l'examen de ce graphique :

- Les mesures faites sur les petits agrégats donnent des résultats parfois très inférieurs à ceux obtenus précédemment. Les petits volumes considérés (⌀ 2 à 3 mm) sont, en effet, plus ou moins assimilables à des associations continues d'assemblages élémentaires (de particules argileuses, limoneuses et sableuses). Leur porosité se rapproche, dans ce cas, d'une caractéristique "texturale" (selon la définition de FIES, 1971). Elle atteint des valeurs minimales dans les horizons $\overset{1}{A}B$ des deux profils (35 % dans le sol rouge - 31 % dans le beige) au niveau où l'argile est en quantité suffisante (10 à 15 %) pour assurer le remplissage des espaces intergranulaires du squelette.

- Les écarts entre les porosités mesurées sur agrégats et celles déterminées sur les cylindres de terre, sont significatifs de la porosité "structurale" de maille comprise entre 3 mm et 5 cm (il s'agit principalement de porosité biologique large : cavités et pédotubules) .

. Dans le sol rouge à nuances jaunes (premiers indices marquant le passage aux sols de transition), cette porosité, très régulièrement répartie dans l'horizon B 2 (8 à 9 %) présente un étranglement à la base de l'horizon B 1 (5 %) et s'accroît en surface.

. Dans le sol beige, ses variations sont beaucoup plus importantes : 7 à 4 % dans les horizons B 22 et B 21, étranglement très accusé dans l'horizon B 1 (1,5 %), maximums élevés dans les horizons AB et A (17 et 12 %).La porosité structurale large qui correspond aux fentes de retrait, particulièrement développées dans l'horizon B 1 de sol beige, n'est pas prise en compte par ces mesures qui portent sur des volumes dont l'échelle est très inférieure à la maille de leur distribution.

- Les écarts entre les porosités mesurées sur les cylindres et celles déterminées sur les cubes (arête : 1 dm) sont d'autant plus difficiles à interpréter qu'ils résultent de deux effets opposés : accroissement lié à la prise en compte de la porosité structurale de maille centimétrique à décimétrique, diminution due au fait que les cylindres ont été découpés à l'état humide et les cubes après retrait au cours de la dessiccation. La résultante de ces effets est toujours faible dans le sol rouge (en raison semble-t-il, de l'absence de porosité structurale à maille très large et de la faible importance du retrait), elle est plus importante et variable dans le

beige (où il est difficile de faire la part de l'un et l'autre effet, plus ou moins liés d'ailleurs). Les fentes les plus importantes ne sont pas plus prises en compte par cette mesure que par les précédentes (les cubes étant découpés dans les volumes délimités par les fentes de retrait).

Retenons principalement de cette étude comparative que la porosité "structurale" de maille millimétrique à centimétrique est répartie de façon beaucoup plus homogène dans le profil de sol rouge que dans celui de sol beige (où elle présente des valeurs extrêmes, minimales et maximales).

Les vides larges et continus qui lui correspondent, constituent les voies de pénétration préférentielle des courants hydrogazeux et exercent, de ce fait, une action déterminante sur le fonctionnement hydrique des sols.

3/ - Relations avec les données morphologiques.

Plusieurs constatations résultent de la seule confrontation des données.

a) Les porosités les plus faibles correspondent généralement à des zones de transition des caractères morphologiques, portant en particulier sur la couleur et sur la structure.

Ceci est vrai à l'échelle des profils pédologiques : ainsi, dans les sols rouges non typiques, les minimums de porosité correspondent aux niveaux marqués par les gradations de nuances brunes, puis jaune rouge et enfin rouges dans les horizons AB et B 1, qui coïncident elles-mêmes avec le passage de la structure polyédrique grossière à la structure massive à sous-structure grenue.

Ceci est également vrai à l'échelle des variations latérales qui caractérisent la toposéquence : ainsi, le minimum absolu de porosité est localisé dans l'horizon B 1 du sol de transition sensu stricto qui marque le passage des sols rouges aux sols beiges.

b) Si aucune variation significative de la porosité (en valeur absolue) ne caractérise les niveaux où se différencient formes nodulaires et nodules, on constate toutefois que ces derniers sont toujours sous-jacents à des horizons présentant un minimum accentué de porosité totale (et plus encore de porosité structurale).

Cette relation est observée, dans tous les cas, entre les porosités des horizons B 1 de sols rouges (non typiques et cultivés), de sols de transition et de sols beiges et la présence de formes nodulaires et nodules plus ou moins contrastés dans les horizons B 2 des mêmes sols.

c) Si les variations de la porosité totale mesurée ne correspondent pas de façon satisfaisante à celles déduites des observations faites sur le terrain, ces dernières, qui prennent particulièrement en compte la porosité d'origine biologique (tubules, vacuoles....), s'accordent mieux cependant avec les déterminations de la porosité "structurale" (de maille comprise entre 3 mm et 5 cm).

4/ - Conclusion.

Considérées isolément, les valeurs globales de la porosité rendent compte, par leurs variations, de l'existence de différenciations verticales et latérales qui caractérisent la toposéquence.

En l'absence d'autres données, elles ne sauraient cependant fournir les bases nécessaires à l'étude de la dynamique de l'eau et de ses effets sur la pédogénèse.

Une autre approche se révèle donc nécessaire à l'établissement d'une caractérisation fonctionnelle des systèmes poreux.

B - VARIATIONS DE LA COMPOSITION VOLUMIQUE.

Afin d'en déduire une connaissance de la genèse, de l'évolution et du fonctionnement des systèmes de porosité, nous tenterons d'évaluer ici :

- les volumes respectifs du squelette et de l'argile dans la matière solide.
- les proportions des volumes des vides occupés par l'eau de façon fréquente ou occasionnelle.

1/ - Méthodes utilisées.

On utilisera, dans ce cas encore, les prélèvements de 100 cm^3

faits au cylindre, dans le sol en place, à l'état humide (en fin de saison des pluies). On déduit de leur poids à l'état sec, des données granulométriques et des densités réelles, les volumes respectivement occupés par le squelette et par l'argile (représentés par les surfaces situées à droite des diagrammes de composition volumique) ainsi que ceux correspondants à la porosité globale (déjà connus, figurés par les surfaces situées à gauche du trait renforcé).

La détermination de l'humidité volumique est faite sur ces mêmes prélèvements. Il est donc possible de connaître avec précision les volumes occupés par la solution du sol, par la matière solide et par les gaz (obtenus par différence) au moment correspondant.

La comparaison avec l'ensemble des mesures d'humidités faites tout au long de l'année climatique (1) révèle que, dans certains cas, cet état d'humectation se situe au niveau de la capacité au champ (2), c'est-à-dire du palier d'humidité qui marque le passage de la dynamique rapide d'infiltration (pendant et après la pluie) à celle plus lente de redistribution qui lui succède en l'absence de toute limitation au drainage ; dans d'autres cas, une humidité supérieure à cette valeur indique la présence d'eau soumise à l'écoulement gravitaire dans les macropores, caractéristique d'une situation d'engorgement dont la durée dépend des possibilités de drainage.

---

(1) L'interprétation de l'ensemble de ces mesures fera l'objet du sous-chapitre suivant.

(2) La détermination de la capacité au champ a été faite à partir des humidités mesurées sur le terrain, en considérant chaque situation, en relation avec les précipitations des jours précédents, compte tenu des observations faites sur le terrain, de façon à apprécier l'état de ressuyage (sans engorgement ni dessiccation)

- Dans les sols rouges, dont la perméabilité est élevée, ont été reconnues des valeurs "paliers" stables. On a déterminé qu'elles correspondaient à des pF compris entre 2,0 et 2,8 selon les horizons.

- Dans les sols beiges, les phénomènes paraissent plus complexes et, à côté de paliers nets, des valeurs apparemment excessives ont été interprétées comme étant les indices d'état d'engorgements liés à des défauts de perméabilité. Ces situations ont été éliminées de façon à ne retenir que des valeurs stables. On a alors constaté qu'elles correspondaient à des pF plus diversifiés que dans le sol rouge (compris entre 2,0 et 3), en relation avec la texture des horizons. A partir de ces résultats, les humidités à la capacité au champ ont été évaluées par extrapolation.

Afin de donner une signification plus générale à la représentation faite, les surfaces situées à gauche du diagramme représentent les volumes occupés par l'eau :

- à la capacité au champ
- aux plus fortes humidités (quelques heures après des précipitations de l'ordre de 40 mm)
- aux plus faibles humidités (en fin de saison sèche, au voisinage du point de flétrissement sous forêt).

Le complément à 100 % des matières solides et liquides (en blanc sur la figure si l'on considère l'humidité maximale) représente la porosité accessible à l'air.

2/ - Résultats.

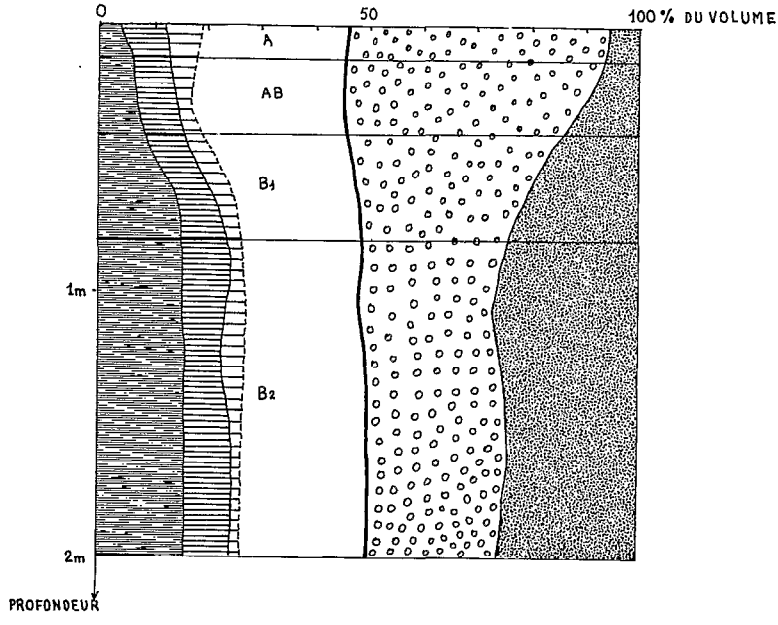
L'examen des graphiques (fig. 8-3) fait ressortir les faits suivants :

Dans le sol rouge typique sous forêt (A), la matière solide occupe un volume sensiblement constant sur 2 mètres de profondeur : la diminution de l'importance relative de l'argile, de bas en haut, à partir du sommet de l'horizon B 2, y est sensiblement compensée par l'augmentation du squelette. A cette variation correspond un accroissement progressif de la macroporosité, déjà exceptionnellement élevée à 2 mètres de profondeur (25 %), atteignant 33 % à proximité de la surface. L'eau excédentaire après de fortes pluies, se répartit régulièrement en profondeur, indice d'un écoulement rapide.

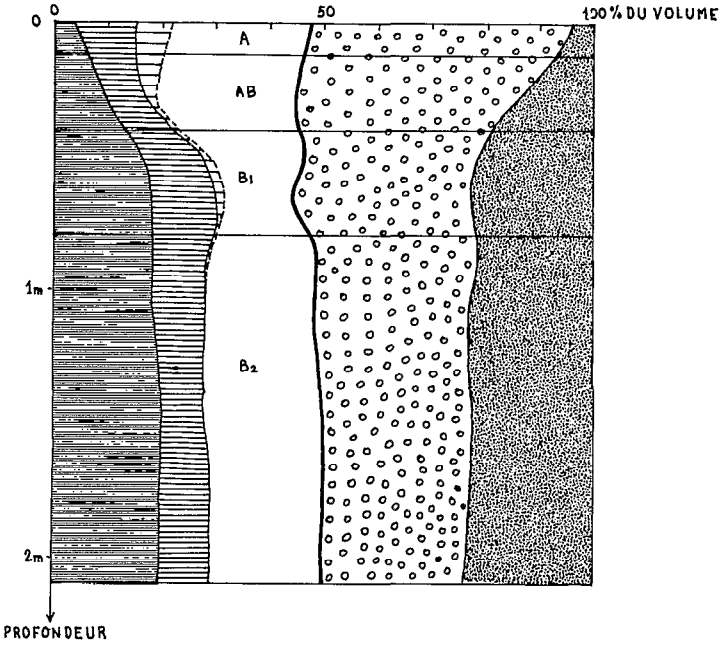
On remarque également :

- les volumes particulièrement faibles occupés par l'eau "utile" (capacité au champ - humidité minimale), inférieurs à 9 %,
- ceux, très élevés, qui correspondent aux humidités minimales en cours de saison sèche (peu différentes des humidités à pF 4,2) (une partie importante de la porosité, voisine de 16 % dans l'horizon B 2, se comporte donc comme si elle était caractérisée par de très petits diamètres).

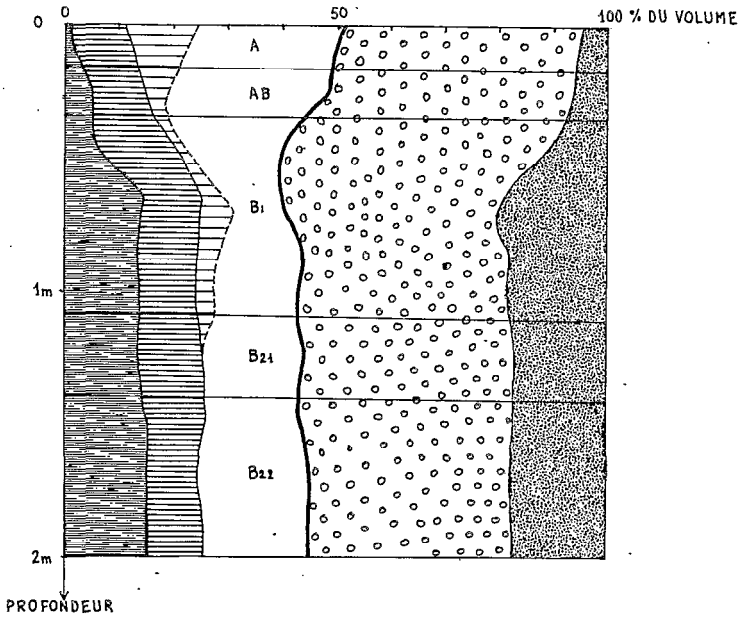
. Toutes ces propriétés caractérisent en fait l'ensemble des sols rouges ferrallitiques, ou leurs équivalents dans la classification américaine : les oxisols. A leur sujet VAN WAMBEKE (1974) écrit que



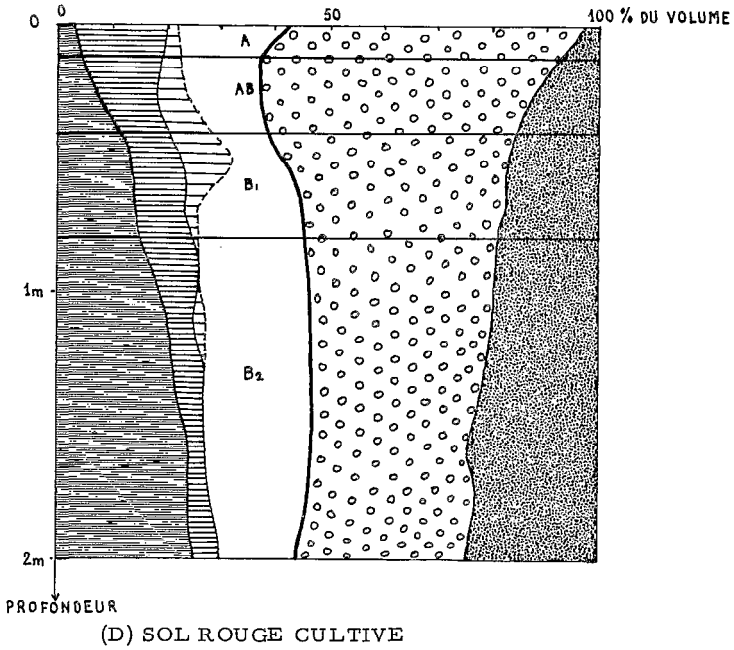
(A) SOL ROUGE TYPIQUE SOUS FORET



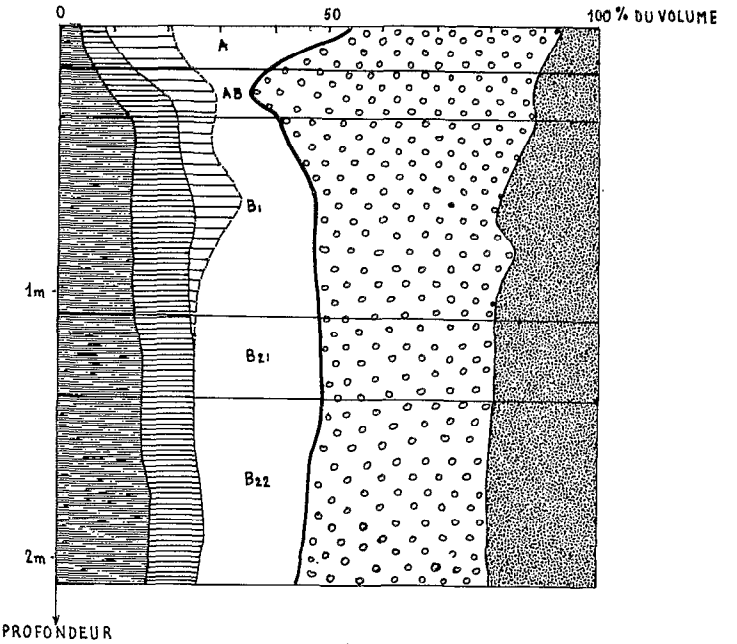
(B) SOL ROUGE A NUANCES JAUNES SOUS FORET



(C) SOL BEIGE TYPIQUE SOUS FORET



(D) SOL ROUGE CULTIVE



(E) SOL BEIGE CULTIVE

Fig. 8-3 - A B C D E

COMPOSITIONS VOLUMIQUES

Argile

Squelette

Matière solide

Humidité minimale (en fin de saison sèche)

Eau "utile"

Eau excédentaire (humidité maximale)

Porosité minimale accessible à l'air

Vides occupés par l'eau ou par l'air

"le comportement de l'eau (eau utile, drainage, conductivité hydrique) y est souvent comparé à celui qui se manifeste dans les sols sablonneux [1] avec cette distinction toutefois que la teneur en eau au point de flétrissement est beaucoup plus élevée dans les oxisols".

Dans le sol beige typique sous forêt (B), les variations verticales du volume occupé par la matière solide (maximum dans l'horizon B 1 : 60 %) résultent de celles qui correspondent respectivement à l'argile (maximum au milieu de l'horizon B 1 : 60 %) et au squelette (maximum au sommet de l'horizon B 1 : 20 %). La macroporosité, moyenne dans les horizons B 22 et B 21 (19 %), présente un étranglement dans l'horizon B 1 (15 %) et atteint des valeurs exceptionnelles dans les horizons superficiels (40 %). L'eau excédentaire, 24 heures après de fortes pluies, reste accumulée dans cette partie haute du profil (indiquant une limitation de la vitesse d'écoulement) et dans l'horizon B 1 où sa rétention suggère que l'on prête attention au problème de gonflement [2]. Les volumes occupés par l'eau "utile" sont sensiblement plus élevés que dans le sol rouge, tant en valeur absolue ($\geq$10 %) que par leur rapport aux quantités d'argile. Ceux correspondant aux maximums d'humidité restent élevés, sauf dans les horizons superficiels.

. Ce sol diffère donc du sol rouge ferrallitique par sa macroporosité plus irrégulièrement répartie dans le profil, et par des caractéristiques hydriques qui le rendent moins comparable aux sols "sablonneux" (limitation du drainage, rétention au-delà de la capacité au champ, accroissement de la capacité "utile") contrairement au classement qui pourrait être déduit des seuls résultats de l'analyse granulométrique.

Présentant des caractéristiques intermédiaires entre ces extrêmes :

Un sol rouge à nuance jaune (premier indice de variation à l'approche du sol de transition sensu stricto) sous forêt (C) ne présente qu'un maximum d'argile à peine perceptible dans l'horizon B 1, qui correspond

---

(1) Selon cet auteur, la conductivité hydrique de ces sols décroîtrait abruptement dès que la tension dépasse 1 bar.

(2) Ce problème sera abordé ultérieurement au chapitre 10.

cependant à une nette augmentation de la capacité utile pour l'eau (en valeur absolue et par rapport aux quantités d'argile). Il en résulte un étranglement de la macroporosité (portée à ce niveau à 14 %).

Un sol rouge cultivé (D) ne présente pas ici de maximum d'argile différencié dans l'horizon B 1, mais seulement un maximum de squelette dans l'horizon AB, et surtout une augmentation de la capacité utile pour l'eau et une rétention au-delà de la capacité au champ dans la partie supérieure du profil. Il s'agit là d'une modification du comportement hydrique qui est indépendante de la teneur en argile (1).

3/ - Conclusion.

Cette brève étude des variations de la composition volumique montre que les systèmes de porosité des sols rouges et beiges diffèrent davantage par les modalités de leur fonctionnement que par leurs seules caractéristiques quantitatives.

Dès à présent, il apparaît que la macroporosité n'est jamais totalement occupée par l'eau, et donc que l'état de saturation n'est pas atteint ou ne l'est que de façon très fugace. On en déduit qu'aucune nappe ne s'est formée dans les sols étudiés durant la période considérée. Dans ces conditions, les possibilités d'écoulement oblique sont théoriquement nulles ou du moins très limitées (à de brèves périodes de saturation intercalées entre 2 mesures).

. Pour connaître le fonctionnement du système de porosité, il convient maintenant d'étudier la dynamique de l'eau.

---

(1) La modification consécutive à la mise en culture dans le sol beige (fig. 8-3 E), à la différence de celle qui affecte le sol rouge, semble porter plus sur la redistribution et sur le tassement des constituants (en particulier du squelette dans l'horizon AB) que sur le changement des propriétés hydriques seulement marqué par une aggravation de l'engorgement dans les horizons A, AB et B 1.

C - BILANS ET REGIMES HYDRIQUES.

L'objectif poursuivi est double ; il s'agit en effet :

- de compléter la caractérisation des systèmes poreux par une étude de leur fonctionnement dans les conditions naturelles. La comparaison des mesures faites dans des profils différents situés à faible distance les uns des autres, et donc soumis aux mêmes conditions climatiques, constitue alors une méthode intéressante. Plus particulièrement lorsque l'ensemble est groupé à proximité d'une station (celle de Séfa) où sont régulièrement mesurées la pluviosité et l'évapotranspiration potentielle.

- de déterminer le régime hydrique des sols en tant que facteur de leur évolution : on portera surtout l'attention sur les possibilités de drainage, de saturation, d'écoulement latéral, de dessiccation..., en relation avec les conditions climatiques.

1/ - Méthodes utilisées.

Les humidités volumiques ont été évaluées de plusieurs façons :

- dans certains cas par pesée, avant et après séchage à l'étuve à 105°, de volumes de 100 cm^3 prélevés au cylindre, dans le sol en place au fur et à mesure du creusement des tranchées. Ces mesures précises et répétées de nombreuses fois pour chaque niveau renseignent également sur l'hétérogénéité de l'humectation.

- dans d'autres cas par transformation des mesures pondérales (multipliées par les densités apparentes déterminées par ailleurs) faites sur des échantillons prélevés à la tarière (de 10 en 10 et de 20 en 20 cm), jusqu'à 2,20 ou 5 mètres de profondeur. Au total 15 séries de mesures ont ainsi été réalisées sur 4 profils caractéristiques de sols rouges et beiges, sous forêt et sous culture (en collaboration avec TOBIAS, 1965, de mai 1964 à août 1965).

Une certaine imprécision tient, dans ce cas, à l'impossibilité de connaître les valeurs exactes de la densité apparente à l'emplacement exact du prélèvement. On se gardera donc d'attribuer une signification précise à des variations d'humidité dont l'ordre de grandeur ne dépasse pas 1 %.

L'interprétation de toutes les données obtenues est faite :

- soit en considérant globalement les stocks d'eau contenus dans la couche de 0 à 2 mètres de profondeur, exprimés en hauteur d'eau équivalente, puis en étudiant leurs variations au cours de périodes bien définies, en termes de bilans successifs, en regard des données climatiques cumulées correspondantes .

- soit en analysant plus en détail les variations verticales de l'humidité dans le profil à des moments donnés, ou encore les variations dans le temps en un même niveau du sol au cours d'une année climatique.

2/ - Les résultats.

a) exprimés en termes de bilans

Sur le graphique de la fig. 8-4 ont été figurés les stocks d'eau (compris entre 0 et 2 mètres) et leurs variations dans deux sols (rouge et beige) situés sous forêt ainsi que les bilans climatiques cumulés correspondants aux périodes intercalaires, également exprimés en millimètres d'eau.

L'examen de ce graphique fait apparaître les faits suivants :

- les stocks d'eau sont à tout moment plus élevés dans le sol rouge (c'est au moment où l'humectation est la plus forte que la différence avec le sol beige est la plus réduite)

- l'amplitude des variations y est cependant moindre, en valeur absolue (221,8 contre 253,8), et plus encore en valeur relative (rapport du maximum au minimum 1,70 contre 2,14).

- l'allure des variations est aussi un peu différente :

. à l'humectation, le maximum est atteint dans le sol rouge plus tôt, après les fortes précipitations d'août et de début septembre, alors que l'eau continue à s'accumuler dans le sol beige jusqu'aux dernières pluies fréquentes d'octobre,

. durant la saison sèche, les pertes d'eau sont d'abord plus fortes dans le sol rouge (du 3 au 24 novembre), elles s'y atténuent ensuite et n'augmentent que fai-

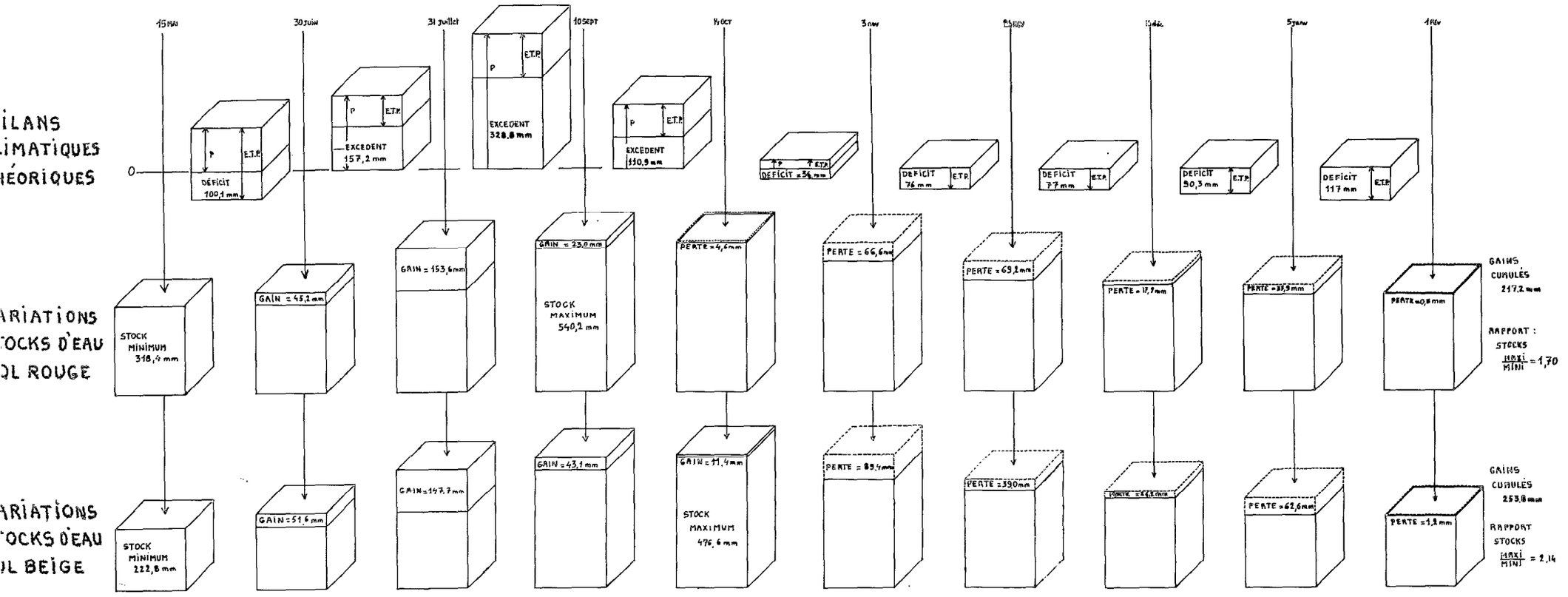


Fig. 8-4 - Bilans climatiques théoriques et variation des stocks d'eau dans deux sols (rouge et beige) situés sous forêt.

blement lorsque s'accroît la demande climatique (du 16 décembre au 5 janvier). A l'inverse, les pertes d'eau dans le sol beige sont d'abord plus faibles, mais elles augmentent fortement (en même temps que l'E. T. P.[1]) du 16 décembre au 5 janvier.

- l'excédent climatique théorique est très supérieur à l'augmentation des stocks dans l'un et l'autre sol du 31 juillet au 14 octobre, ce qui indique une perte importante, soit par drainage (à plus de 2 mètres de profondeur), soit par écoulement latéral (hors de la zone). En supposant l'E. T. R.[1] égale à l'E. T. P., cette perte porterait sur plus de 200 mm d'eau dans l'un et l'autre sol (pour une pluviosité annuelle de 1406 mm en 1964, cette perte s'élèverait à 280 mm dans le sol rouge et à 243 dans le beige).

La même expression des mesures d'humidité appliquée aux sols cultivés est moins révélatrice des comportements spécifiques de chaque type de sol :

- les stocks d'eau y sont globalement plus importants (de 0 à 2 mètres de profondeur) que ceux déterminés sous forêt, en fin de saison sèche : 335,2 mm dans le sol rouge, 274,0 dans le beige,

- ils s'accroissent plus rapidement lors des premières pluies : du 15 mai au 30 juin, la pluviosité étant inférieure à l'E. T. P. et la végétation réduite, les gains sont de 63,8 mm dans le sol rouge et de 85,4 dans le beige,

- ils atteignent leurs valeurs maximales vers le 10 septembre (supérieures ou égales à celles mesurées sous forêt),

- ils diminuent très fortement après les dernières pluies : du 3 au 24 novembre, la perte est de 108,6 mm dans le sol rouge, de 106,8 mm dans le beige, très supérieure à l'E. T. P. (76 mm) ce qui implique qu'il y ait drainage (ou écoulement latéral hors de la zone) de l'eau excédentaire,

---

(1) E. T. P. : évapotranspiration potentielle.
E. T. R. : " réelle.

- ils diffèrent sensiblement (± 50 mm) d'une année sur l'autre en fin de saison sèche, selon les conditions climatiques et surtout selon les cultures faites durant la précédente saison humide,

- la différence entre l'excédent climatique théorique et l'augmentation du stock d'eau est pratiquement identique dans le sol rouge et dans le sol beige (respectivement 298 et 293 mm) pour une même culture de riz pluvial.

. L'intervention humaine a donc pour effet d'uniformiser les variations du stock d'eau (considéré globalement de 0 à 2 mètres de profondeur) et de leur imposer une allure qui dépend davantage de la culture faite que des propriétés initiales du sol (caractérisée en général par de plus fortes variations des réserves en eau au début et à la fin de la saison des pluies).

b) exprimés par leurs variations dans l'espace et dans le temps.

Toutes les différences de comportement global vis-à-vis de l'eau, décelées dans des conditions naturelles identiques au cours d'un cycle climatique, ne peuvent être attribuées qu'au mode de superposition et aux caractéristiques intrinsèques des matériaux.

Les profils hydriques tracés sur la fig. 8-5, correspondent aux limites de temps envisagées précédemment, tandis que les surfaces hachurées indiquent la répartition des gains et des pertes entre deux mesures.

On examinera successivement les profils de sol rouge et beige situés sous un même couvert forestier, puis, à titre de comparaison, ceux des sols cultivés soumis à des conditions différentes.

Les accroissements successifs des réserves en eau du sol au cours de la phase d'humectation sont figurés par des hachures horizontales (de plus en plus rapprochées) et par la couleur noire.

Durant la première période : du 15 mai au 30 juin, caractérisée par des pluies irrégulièrement espacées mais souvent fortes (4 pluviosités journalières supérieures à 20 mm dont 2 en 3 jours) :

- La propagation du front d'humectation est régulière et diffuse dans le sol rouge sous forêt : tandis que la couche superficielle est portée au voisinage de la capacité au champ (sur 30 centimètres), les

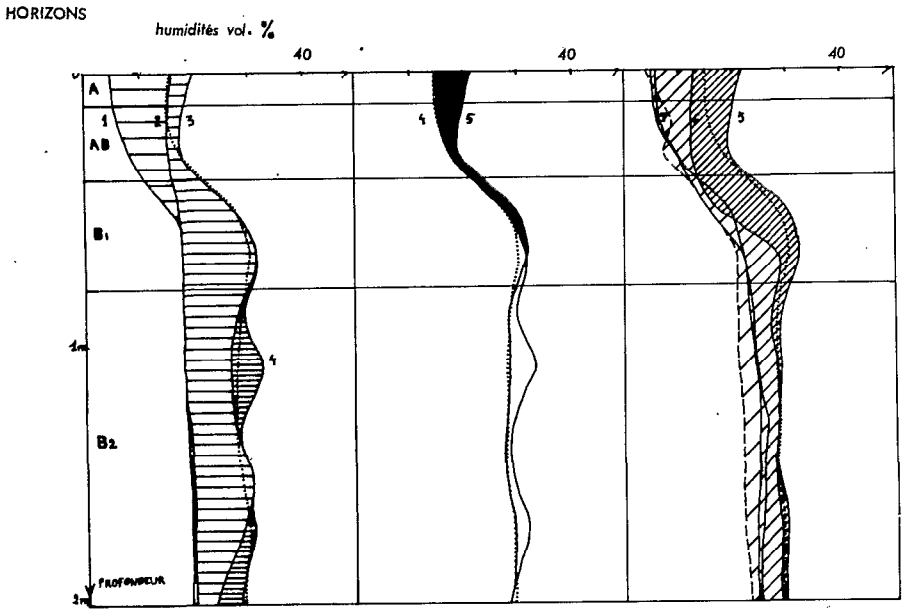


Fig. 8-5 A - SOL ROUGE SOUS FORET

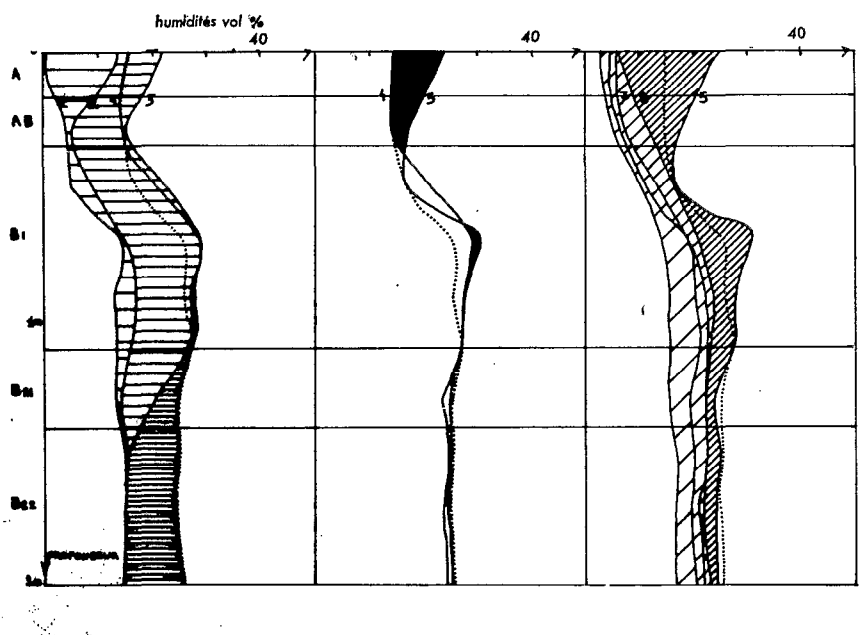


Fig. 8-5 B - SOL BEIGE SOUS FORET

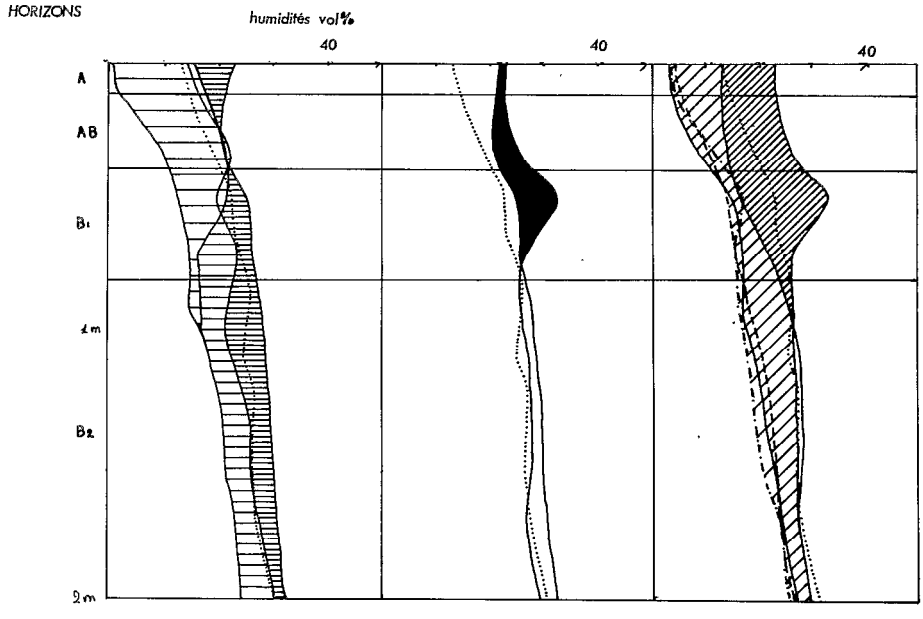


Fig. 8-5 C - SOL ROUGE SOUS CULTURE

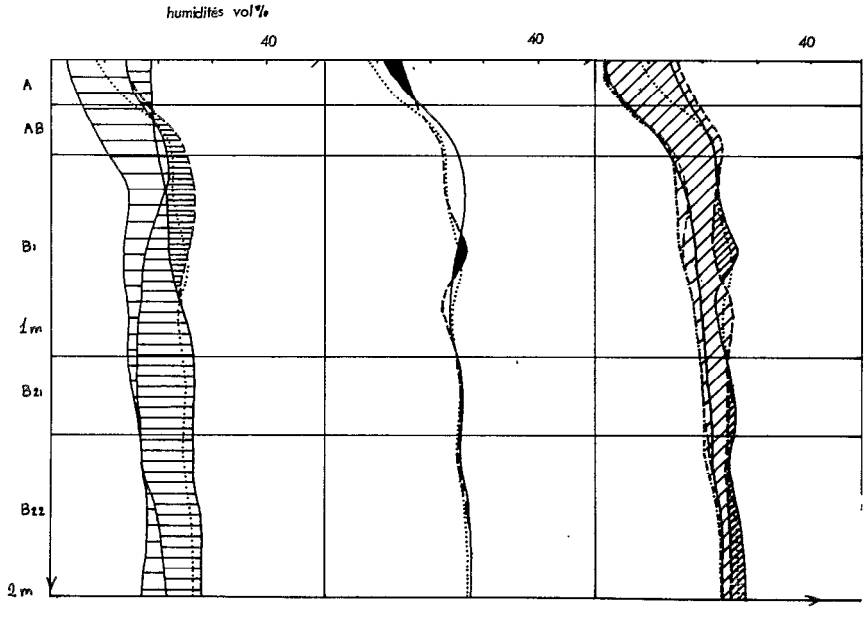


Fig. 8-5 D - SOL BEIGE SOUS CULTURE

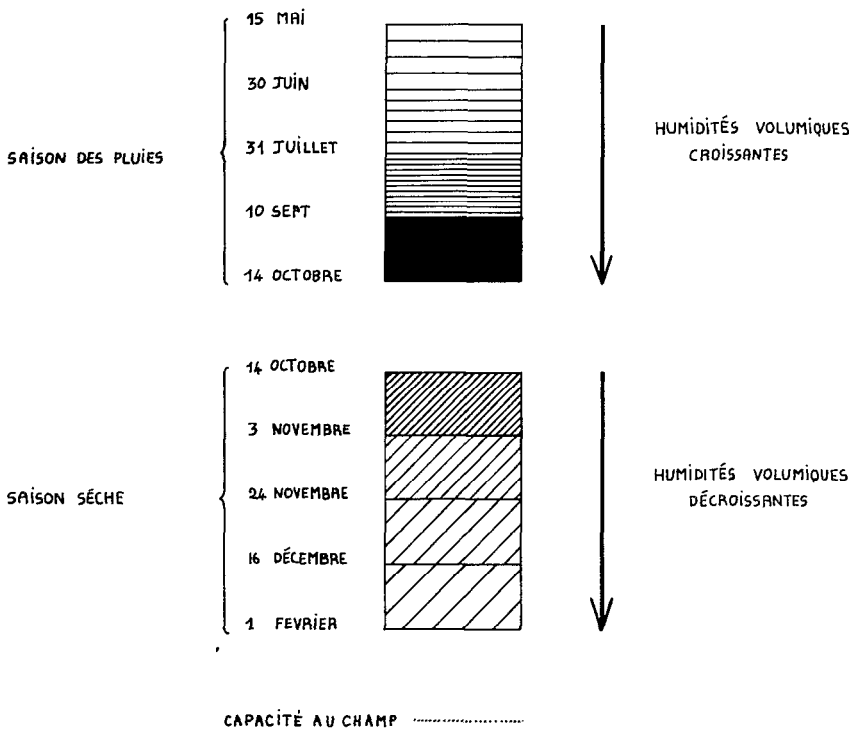


Fig. 8-5 -Régime hydrique des sols rouges et des sols beiges *sous forêt et sous culture.*

niveaux sous-jacents s'humectent progressivement (sur près de 20 centimètres) et l'humidité reste stable dans les horizons plus profonds.

- La pénétration de l'eau est, à l'inverse irrégulière et profonde dans le sol beige sous forêt : elle y atteint 1,4 mètre alors que seul le niveau le plus superficiel est porté au voisinage de la capacité au champ. Ceci ne peut être expliqué que par une circulation rapide de l'eau dans les pores les plus grossiers (fentes de retrait et vides biologiques) et par une diffusion latérale à partir de ces voies de pénétration préférentielles. Ceci est confirmé par l'extrême hétérogénéité des mesures d'humidité faites au cylindre à cette époque.

- L'humectation du sol rouge modifié par la culture (dont le bilan hydrique est plus largement bénéficiaire) est comparable à celle observée dans le même sol sous forêt en ce qui concerne la couche superficielle (humidité portée au voisinage et même au-delà de la capacité au champ sur 50 centimètres) mais rappelle celle du sol beige par une pénétration plus profonde de l'eau à travers des niveaux qui ne sont que partiellement humidifiés.

- Le sol beige cultivé, enfin, est, comme son équivalent sous forêt, caractérisé par une pénétration profonde et irrégulière de l'eau (responsable d'une faible évapotranspiration réelle).

Lors de la seconde période : du 30 juin au 31 juillet des pluies fortes et fréquentes se succèdent jusqu'à la veille du jour où ont été faites les mesures.

- La pénétration de l'eau dans le sol rouge sous forêt est alors profonde (jusqu'à 2 mètres) et ne s'accompagne que d'engorgements faibles et fluctuants (sauf dans l'horizon A).

- Cependant l'humidité ne gagne pas en profondeur dans le sol beige sous forêt : elle y dépasse la valeur de la capacité au champ jusqu'à près de 1 mètre (il y a donc engorgement), s'accroît de 100 à 140 centimètres et reste stable au-dessous (au voisinage du point de flétrissement).

Entre le 31 juillet et le 10 septembre, les pluies sont nombreuses, fortes et fréquentes, mais elles s'interrompent 4 jours avant les mesures :

- seules sont alors décelées dans le sol rouge, de faibles fluctuations au voisinage de la capacité au champ.

- L'humidité dans le sol beige sous forêt approche alors la capacité au champ dans la partie superficielle du profil (de 0 à 30 centimètres), la dépasse nettement de 30 à 100 centimètres, et s'aligne sur elle dans les horizons profonds.

- Un engorgement généralisé caractérise alors l'ensemble des profils de tous les sols cultivés (rouge et beige).

Du 10 septembre au 14 octobre, les pluies sont encore fréquentes mais plus irrégulièrement espacées et moins fortes, la dernière (30 mm) se produit 24 heures avant les mesures.

- L'engorgement réapparaît alors dans les horizons superficiels des sols sous forêt (surtout marqué dans le beige).

- Il se développe fortement de 0 à 70 centimètres dans le sol rouge cultivé (où l'humidité atteint des valeurs très supérieures à la capacité au champ.

En bref, la différence de comportement entre les deux sols, sous un même couvert végétal forestier, est surtout marquée :

- au début de la période d'humectation, par le fait que, dans le sol rouge, le front d'humectation gagne progressivement en profondeur à mesure que les couches plus superficielles sont portées à la capacité au champ, tandis que dans le beige, l'eau circule rapidement jusqu'à une profondeur voisine de 1,4 mètre (on a alors une distribution hétérogène de l'eau) et se répartit ensuite dans la masse du sol qu'elle engorge avant de pénétrer plus avant (ce qui donne un profil contrasté).

- ultérieurement, par l'apparition et le développement de niveaux d'engorgement qui, dans le sol rouge restent fluctuants et peu accentués (sauf dans l'horizon A), mais qui dans le sol beige deviennent très importants de 0 à 20 centimètres (horizon A) et quasi permanent de 40 à 100 centimètres (horizon B 1).

Sous l'effet de la mise en culture, le régime hydrique du sol rouge tend à se rapprocher de celui du sol beige maintenu sous forêt, tant par

les modalités de son humectation, que par le développement des engorgements.

Les pertes d'eau lors de la phase de dessiccation sont représentées par des hachures obliques (de moins en moins rapprochées).

Entre le 14 octobre et le 3 novembre, 3 précipitations moyennes (de l'ordre de 10 millimètres) interviennent encore, l'E. T. P. reste faible.

- Les quantités d'eau perdues sous couvert forestier correspondent d'abord à celles qui étaient retenues au-delà de la capacité au champ (eau dite "libre") peu importantes dans le sol rouge (entre 0 et 30 centimètres), beaucoup plus abondantes dans le beige (de 0 à 30 et de 60 à 100 centimètres) ; elles portent également sur les réserves "utiles" contenues dans les 60 centimètres superficiels très exploités par les systèmes racinaires des strates herbacées et arbustives mais s'étendent plus profondément dans le sol beige (de 1 à 2 mètres).

- Sans culture le ressuyage est très important dans la partie superficielle du sol rouge (de 0 à 70 centimètres), très limité dans le beige.

Du 3 au 24 novembre, la pluviosité s'annule mais l'évapotranspiration reste moyenne.

-Les pertes d'eau sous forêt sont alors plus importantes dans le sol rouge (voisines du déficit climatique théorique), où elles se répartissent sur l'ensemble du profil (mis à part la partie supérieure de l'horizon B 1 dont les réserves sont déjà épuisées) que dans le sol beige (elles y affectent principalement les horizons A, AB et B 1).

- Elles sont beaucoup plus importantes sous culture, peu différentes globalement d'un sol à l'autre, mais portant davantage sur les horizons B 1 et B 2 du sol rouge et sur la partie plus superficielle du sol beige. Elles correspondent partiellement au drainage, mais surtout à une exploitation intense des réserves en eau du sol par les plantes cultivées (dans le cas présent : riz pluvial) dont le système racinaire a atteint son plein développement.

Du 24 novembre au 16 décembre, les conditions climatiques sont seulement marquées par une faible diminution de la température et par le maintien d'une E. T. P. moyenne.

Dans ces conditions, les pertes d'eau restent très faibles dans tous les sols (où s'établit, semble-t-il, un état d'équilibre).

Au-delà du 16 décembre, la demande climatique s'accroît progressivement (l'évapotranspiration moyenne journalière passant de 3, 5 mm en décembre, à 4, 3 mm en janvier et à 4, 8 en février selon DANCETTE 1973).

- sous forêt, les pertes d'eau affectent alors surtout la base de l'horizon B 1 et les horizons B 2. Elles restent faibles dans le sol rouge mais sont beaucoup plus importantes dans le sol beige qui perd encore, à ces niveaux, 3 à 4 % d'humidité.

C'est au cours des années les plus sèches que les différences les plus accusées sont relevées entre les divers profils (fig. 8-6). Ainsi, en mars 1969 :

. l'humidité reste au voisinage du point de flétrissement dans le sol rouge typique,

. elle descend très nettement en-dessous de la valeur correspondante dans le sol rouge à nuances jaunes qui marque le passage au sol de transition,

. elle révèle encore l'existence d'un déficit en eau dans le sol beige (irrégulièrement développé selon les horizons).

- Dans les sols cultivés, les variations d'humidité s'amortissent rapidement en année normale, tandis que les humidités, de 1 à 2 mètres de profondeur, restent supérieures au point de flétrissement (de 1 à 5 %).

Ce n'est que lors des années particulièrement arides que les différences réapparaissent entre sols rouges et sols beiges. Les derniers manifestent alors une tendance à se dessécher plus intensément, particulièrement au niveau des horizons B 1 et B 21 (fig. 8-6).

En conclusion, les écarts observés entre les comportements des 2 types de sols, durant la saison sèche, tiennent, pour une part aux niveaux d'engorgement présentés lors des dernières pluies, pour l'autre part à leurs réactions dissemblables face à une "demande climatique" croissante :

- exploitation rapide de la plus grande partie des réserves

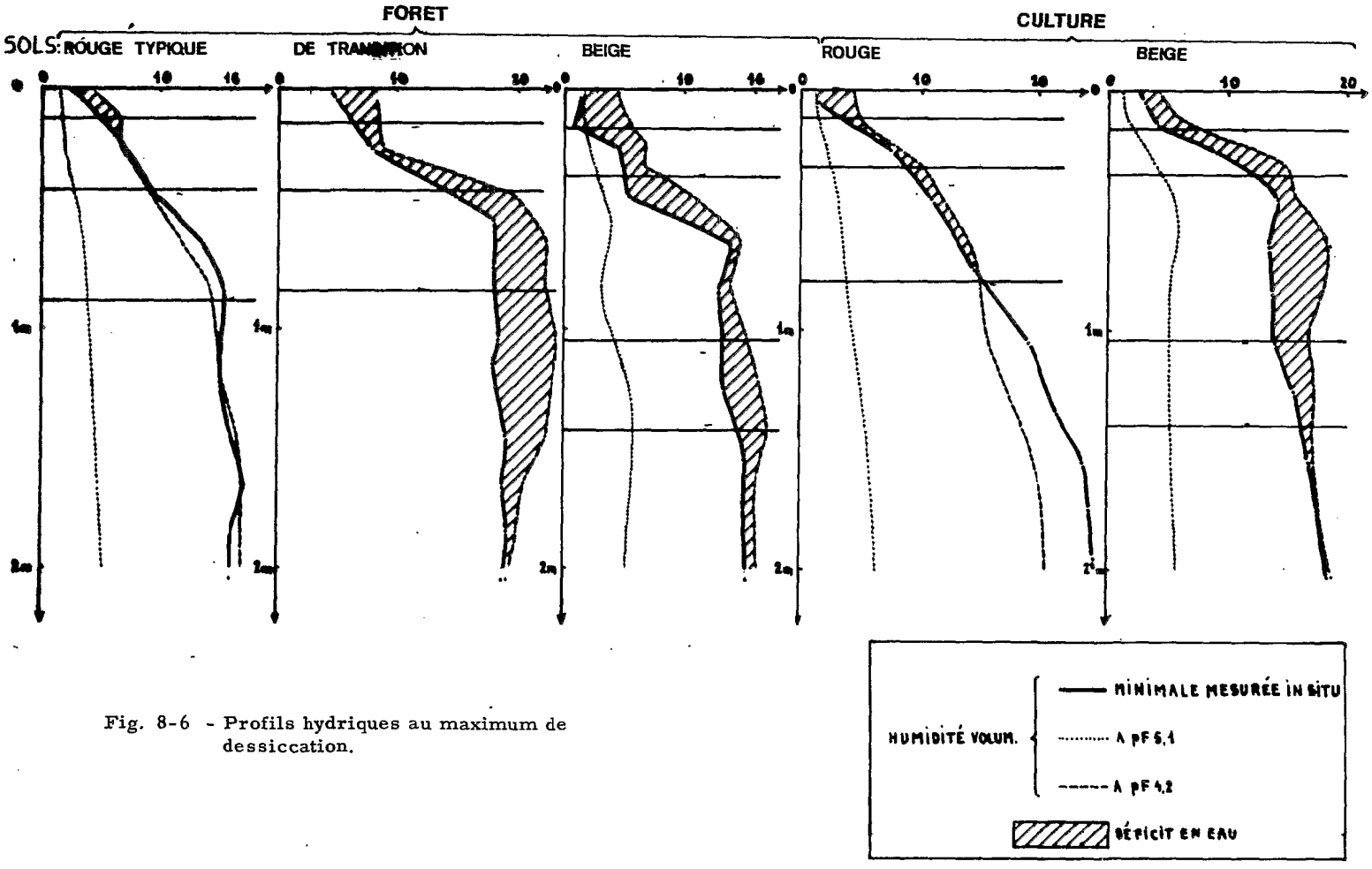


Fig. 8-6 - Profils hydriques au maximum de dessiccation.

"utiles" de 0 à 2 mètres de profondeur dans le sol rouge,

- diminution plus progressive de celles contenues dans les horizons argileux du sol beige, d'autant plus forte que les conditions d'aridité se développent davantage au cours de la saison sèche.

Ces résultats, qui ne peuvent être expliqués uniquement par la meilleure répartition des racines observée dans le sol rouge, mettent obligatoirement en cause une évaporation directe. Des dessiccations inégales supposent alors que les caractéristiques intrinsèques du sol assurent une circulation de l'eau non saturante plus facile et plus brève dans le sol rouge, moins aisée mais plus prolongée dans le beige. Or, une différence de conductibilité hydraulique est nécessairement liée à la morphologie du sol, considérée à l'échelle du profil comme à celle de l'assemblage élémentaire.

c) Les variations de l'humidité volumique (portée en ordonnée) dans chaque couche de sol de 20 centimètres d'épaisseur jusqu'à 2,20 mètres de profondeur (1) en fonction du temps (porté en abscisse) au cours de l'année climatique, sont figurées sur les graphiques de la fig. 8-7.

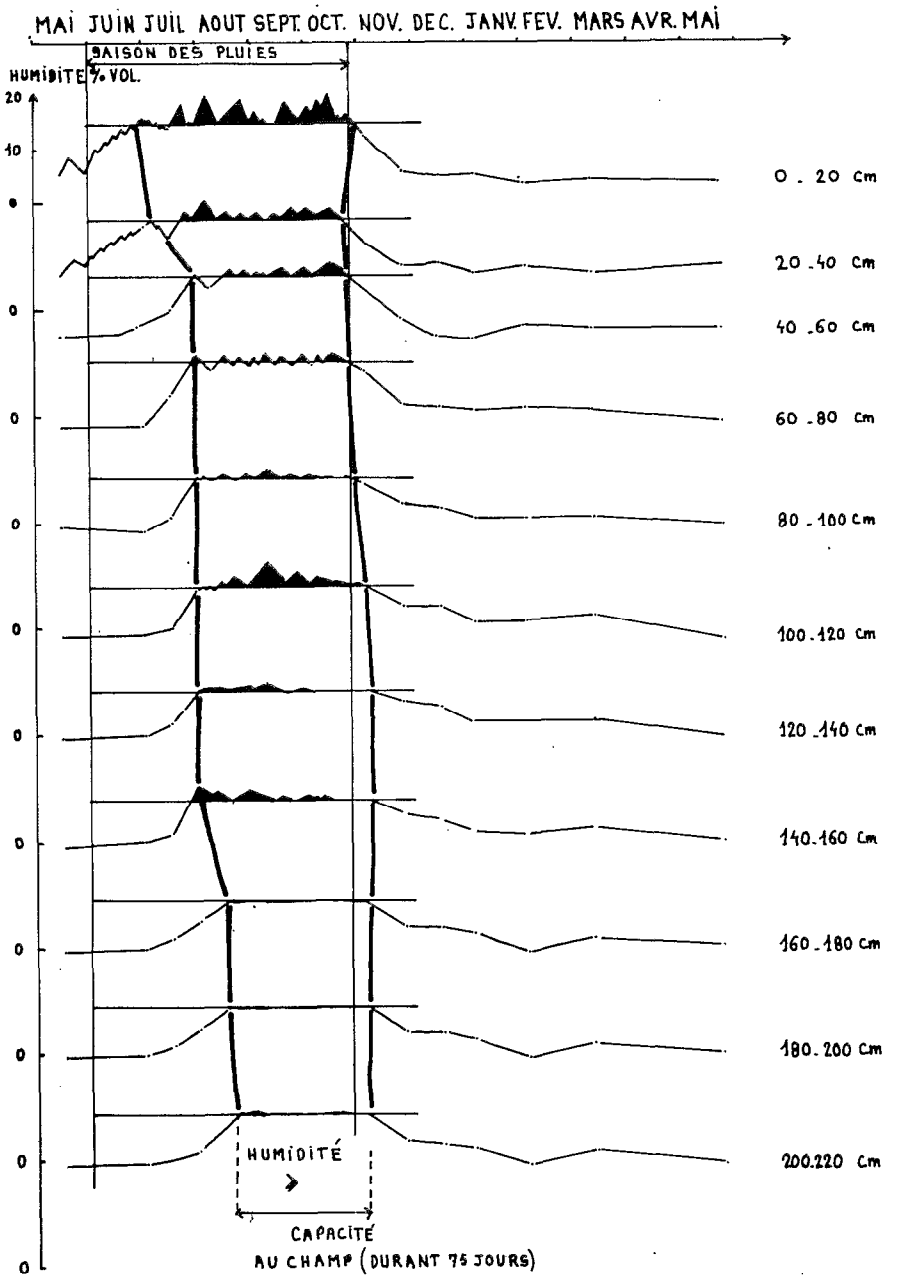
Cette représentation fait apparaître les faits suivants :

1) La période durant laquelle l'humidité est portée, sur 2 mètres de profondeur, à une valeur supérieure ou égale à la capacité au champ, condition nécessaire à l'établissement d'un drainage plus profond, est plus longue de près de 20 jours dans le sol rouge que dans le beige.

2) Cette différence de comportement semble être due à l'évolution de la vitesse de percolation dans le profil au cours de l'année climatique. Si, lors des premières fortes pluies, la pénétration de l'eau s'effectue rapidement dans le sol beige jusqu'à 1,4 mètre, à travers des horizons encore irrégulièrement humectés, lors des dernières, à l'inverse,

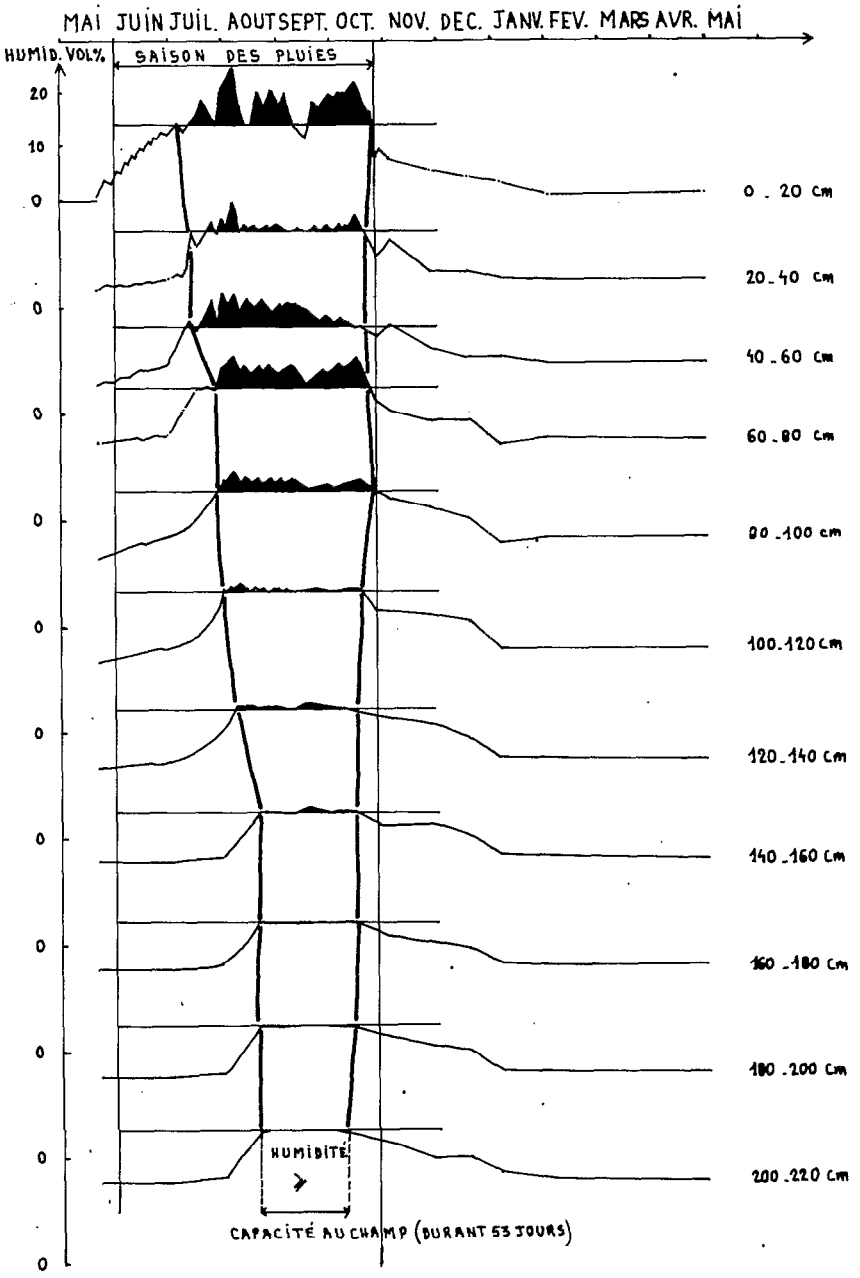
---

(1) Quelques mesures faites sur des échantillons prélevés entre 2,20 et 5 mètres de profondeur indiquent que l'amplitude des variations annuelles d'humidité volumique, de l'ordre de 5 à 7 % dans les sols rouges et beiges sous forêt (proche de la quantité d'eau "utile") diminue fortement après la mise en culture (inférieure à 2 % de 2,20 à 3 mètres, elles est pratiquement nulle de 3 à 5 mètres). Cet effet est directement lié à la destruction de la végétation arborée dont l'enracinement exploite les réserves en eau du sol jusqu'à plus de 5 mètres de profondeur.



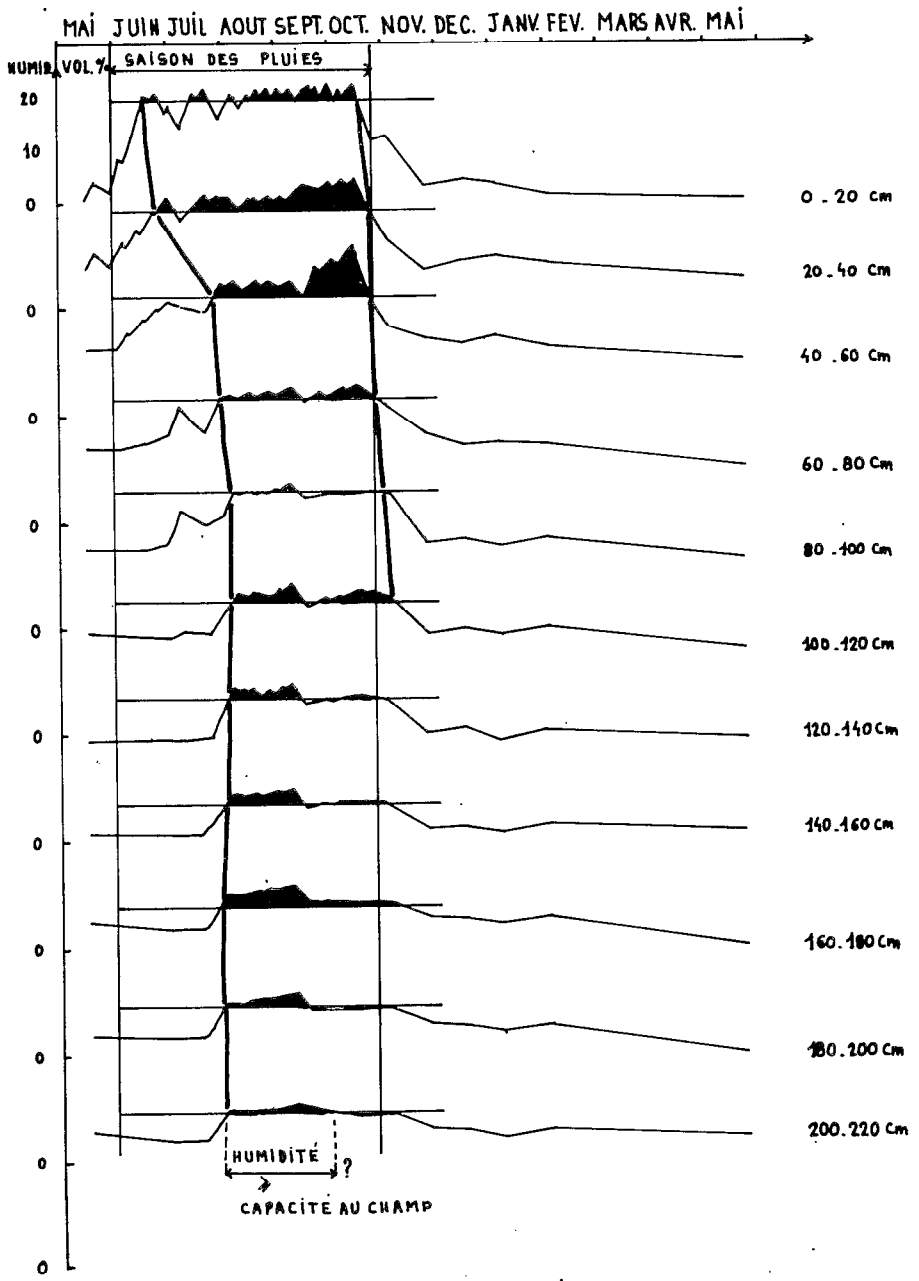
SOL ROUGE SOUS FORET

Fig. 8-7 - Variations de l'humidité volumique dans les différentes couches du sol de 0 à 2 mètres de profondeur,
Sols rouge (A) et beige (B) sous forêt, sols rouge (C) et beige (D) cultivés



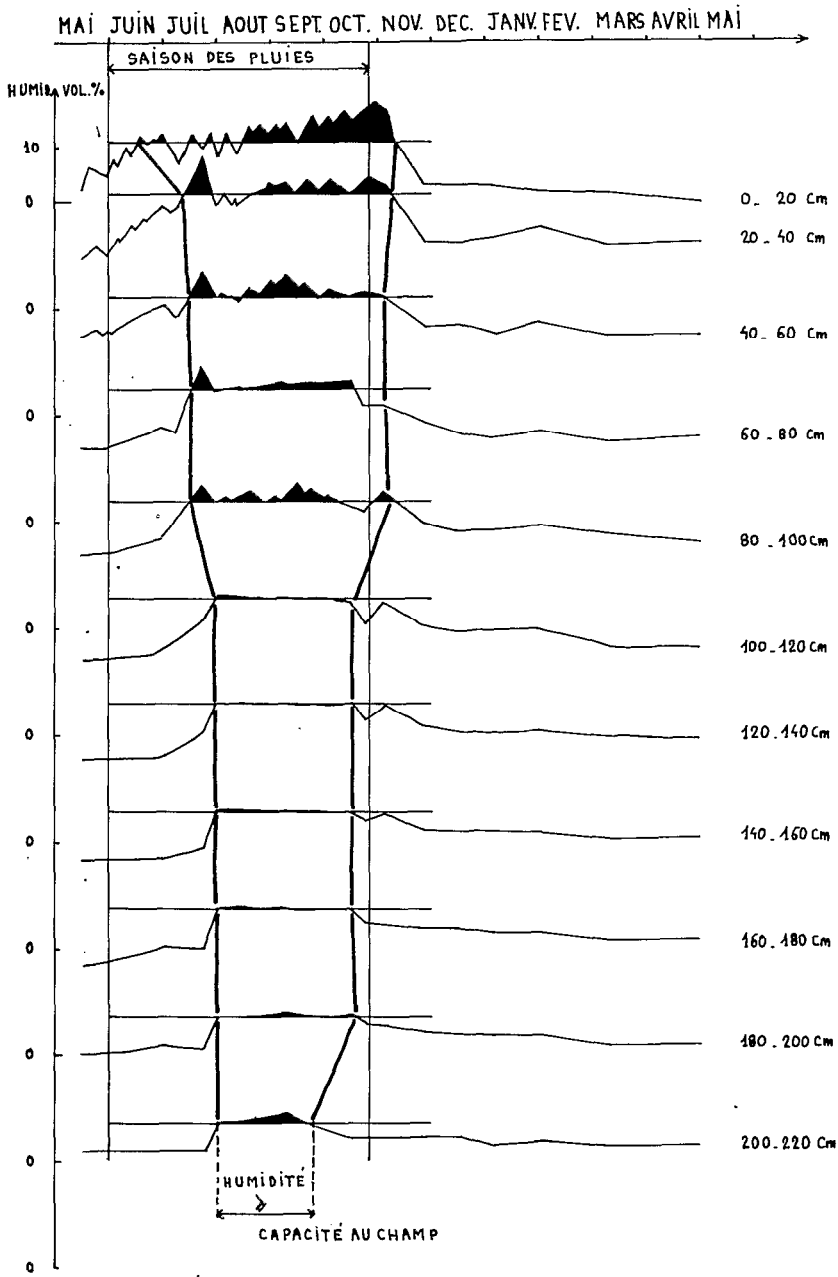
SOL BEIGE SOUS FORET

Fig. 8-7 B



SOL ROUGE CULTIVE

Fig. 8-7 C



SOL BEIGE SOUS CULTURE

Fig. 8-7 D

il semble que la vitesse de percolation de l'eau dans ces mêmes horizons soit réduite à tel point que cela provoque l'engorgement des horizons plus superficiels et la cessation de l'alimentation hydrique des horizons profonds. Cette évolution n'est pas décelée dans le sol rouge sous forêt, mais serait peut-être responsable d'une remontée des niveaux d'engorgement observée dans ces sols cultivés au cours de la saison des pluies. Dans le sol beige, cette évolution est encore accentuée par l'effet de la mise en culture.

Ainsi se manifeste dans certains profils pédologiques étudiés (rouge cultivé et beige) une dualité de comportement entre :

- la partie haute du profil (de 0 à 1,4 mètre dans le sol beige, de 0 à 1 mètre dans le sol rouge cultivé), perméable "en grand" au début de la saison des pluies mais ne laissant l'eau s'écouler qu'à une vitesse de plus en plus lente à mesure qu'elle est, elle-même, humectée puis engorgée,

- sa partie basse dont l'alimentation hydrique est dépendante de cette évolution.

Ce sont les comportements des différents matériaux du sol vis-à-vis de l'eau qui déterminent (sous le même climat et la même couverture végétale) la formation et l'évolution des niveaux d'engorgement dans les horizons pédologiques.

3/ - Interprétation générale.

a) Occupation de la macroporosité par l'eau : problème de l'aération du sol

L'importance pratique des engorgements (mis en évidence sur les figures 8-5 et 8-6 par la rétention d'eau au-delà de la capacité au champ) ne peut être appréciée que par référence aux données relatives à la macroporosité totale (fig. 8-3).

Il apparaît clairement sur le tableau 8-2 que les volumes d'eau excédentaire les plus importants qui aient été mesurés occupent une partie de la macroporosité totale, toujours faible dans le sol rouge, atteignant le tiers de son volume dans le beige, devenant dominante dans les sols cultivés (qu'ils soient rouge ou beige).

Tableau 8-1.

VARIATIONS DES ETATS D'ENGORGEMENT DANS LES HORIZONS DES PROFILS ETUDIES.

(Les flèches verticales indiquent le déplacement du niveau d'engorgement durant la deuxième moitié de la saison des pluies).

Végétation / Sols / Horizons	FORET		CULTURES	
	ROUGE	BEIGE	ROUGE	BEIGE
A	FORTS ET TEMPORAIRES en périodes de pluies fréquentes et abondantes	TRES FORTS, INTERROMPUS seulement par 3 j. sans pluie	FAIBLES ET FREQUENTS	d'abord FAIBLES et DISCONTINUS S'ACCENTUANT fortement en fin de saison des pluies ↑
AB	FAIBLES ET FREQUENTS	FAIBLES ET FREQUENTS	IMPORTANTS s'accentuant au cours de la saison des pluies ↑	IRREGULIERS ET FREQUENTS ↑
B 1	FAIBLES ET FREQUENTS	FORTS et PROLONGES se développant en fin de saison de 60 à 80 cm. ↑	LIMITES AU SOMMET DE L'HORIZON, s'accentuant au cours de la saison des pluies ↑	FAIBLES
B 2	TEMPORAIRES ET LIMITES à la partie supérieure de l'horizon.	PRATIQUEMENT INEXISTANTS	IMPORTANTS au début, s'atténuant en fin de saison des pluies.	FAIBLES

Les volumes restant, dans ces conditions accessibles à l'air, suffisants pour assurer une très bonne aération du sol rouge, se restreignent dans le sol beige et surtout dans les sols cultivés de façon telle que les courants gazeux s'en trouvent alors certainement limités (signalons cependant que les situations considérées correspondent à des mesures faites 24 heures après de très fortes pluies.

Tableau 8-2.

OCCUPATION DE LA MACROPOROSITE PAR L'EAU ET PAR L'AIR.

	SOLS		
	ROUGE (forêt)	BEIGE (forêt)	CULTIVES (rouge ou beige)
Taux de remplissage maximum de la macroporosité par l'eau	15 à 20	33	50 à 60
Minimum de macroporosité restant accessible à l'air	22 %	10 %	7 à 8 %
Localisation du minimum de porosité accessible à l'air	HORIZONS B 2 et B 1	HORIZON B 1	HORIZONS B 1 et AB

b) Eventualité de très brèves périodes de saturation et d'écoulement latéral.

L'absence de toute limitation supérieure des humidités volumiques confirme que la macroporosité n'est jamais totalement emplie par l'eau de façon permanente à l'échelle de temps correspondant aux mesures faites. On en déduit qu'aucune nappe ne s'est formée dans les horizons étudiés durant la période considérée. Ceci est confirmé par l'absence de suintements d'eau sur les parois des tranchées, même au plus fort de la saison des pluies. Dans ces conditions, les possibilités d'écoulement oblique sont théoriquement nulles ou du moins limitées.

Considérons toutefois :

- qu'aucune mesure, ni observation n'a été faite durant les

heures au cours desquelles se succèdent de fortes précipitations.

- que lorsque l'eau est apportée de la surface, une partie de la porosité emprisonne toujours de l'air et que son taux de remplissage par l'eau ne dépasse pas 80 à 90 % (selon FEODOROFF, 1965).

L'impossibilité ou la difficulté qu'éprouve l'air à s'évacuer en cas de pluie intense, fait que la masse d'air emprisonnéegêne la descente de l'eau dans la porosité et qu'ainsi peuvent se réaliser, au-dessus des engorgements, des saturations localisées et fugaces sur ce matelas d'air.*

- qu'un écoulement important intervient rapidement dans les thalwegs après les fortes pluies, même en zone totalement boisée, et qu'il s'interrompt quelques heures plus tard,

- que la porosité structurale à maille large importante des horizons AB de sol beige (cf. fig. 8-2) constitue un drain favorable à l'évacuation rapide de l'eau excédentaire.

Il est donc possible qu'un écoulement latéral subsuperficiel intervienne de façon épisodique, lors des très fortes précipitations (MOREL SEYTHOU, 1973).

c) Limitation du drainage vertical et ses conséquences.

Il apparaît sur la figure 8-7 que la période durant laquelle s'effectue le drainage s'arrête de plus en plus tôt lorsqu'on passe du sol rouge (5 nov.) au sol beige sous forêt (10 oct.) puis aux sols cultivés (1er oct. - 25 sept). (Dans ces derniers cependant, elle commence près de 20 jours plus tôt, aux environs du 1er août). Cette limitation semble être due à une évolution du fonctionnement hydrique de ces sols au niveau des horizons B 1 (et AB) au cours de la saison des pluies, manifestée par une accentuation de l'engorgement dans la partie haute du profil.

Les pertes d'eau minimales calculées (différence entre l'excèdent climatique théorique et l'augmentation mesurée du stock d'eau) sont, dans tous les sols, supérieures à 240 mm ; elles sont probablement beaucoup plus importantes en ce qui concerne les sols cultivés (dont l'E. T. R serait très inférieure à l'E. T. P. au début de la période de culture) Or, cette quantité d'eau est nécessairement drainée (à plus de 2 mètres de profondeur) ou écoulée latéralement hors de la zone.

---

* Les modalités de l'emprisonnement de l'air lors de l'humectation des corps poreux ont fait l'objet d'une étude récente GRAS (1974).

La limitation progressive du drainage vertical au cours de la saison des pluies se traduit alors nécessairement par un accroissement de l'écoulement subsuperficiel (limité dans le sol beige sous forêt) et du ruissellement (très fortement augmenté par la mise en culture selon CHARREAU et NICOU, 1970. cf. chap. 2).

Le ruissellement serait ainsi lié, non seulement à l'action directe de la mise en culture sur la couche superficielle, mais encore et surtout à la transformation des horizons sous-jacents, due au changement des conditions de la pédogénèse, qui rendrait leur fonctionnement hydrique comparable à celui de l'horizon B 1 de sol beige (1).

d) Problèmes posés par les relations entre le fonctionnement hydrique et les caractéristiques morphologiques des horizons.

Deux cas doivent être d'abord distingués :

- Le premier correspond aux horizons dans lesquels l'écoulement de l'eau, rapide et régulier lors de la phase d'humectation, se maintient à un niveau suffisant jusqu'aux dernières pluies pour éviter tout dépassement important de la capacité au champ : ce sont les horizons B de sol rouge sous forêt, ils sont caractérisés par une relative homogénéité de la couleur (rouge), de la texture (plus ou moins masquée par la présence de "granules"), de la structure (massive à sous structure grenue) et de la porosité (interstitielle et tubulaire fine).

- Le deuxième est celui des horizons dans lesquels l'écoulement de l'eau, très rapide et irrégulier lors des premières pluies semble être progressivement ralenti par la suite, de telle sorte que des engorgements s'y développent et s'y maintiennent de façon quasi permanente jus-

---

(1) La très forte porosité des horizons superficiels du sol beige sous forêt s'opposerait au ruissellement, en favorisant l'infiltration et le stockage de l'eau à ce niveau. L'effet exercé par un labour avec enfouissement de matière végétale, surtout manifesté par une diminution de la hauteur d'eau ruisselée après chaque forte pluie (CHARREAU et SEGUY, 1969) pourrait être attribué à la même cause. D'autres observations semblent confirmer l'effet déterminant exercé par la limitation du drainage vertical au niveau des horizons AB et B 1 dans les sols cultivés : selon CHARREAU et FAUCK (1969), le ruissellement serait, à Séfa, pratiquement indépendant de l'influence spécifique des différentes cultures et du développement du couvert végétal (contrairement à l'érosion qui diminue jusqu'à s'annuler lorsque le sol est protégé contre l'énergie cinétique des pluies).

qu'à la fin de la saison humide : il s'agit en particulier des horizons B 1 de sol beige, de couleur brun très pâle à taches diffuses ocre rouille et grisâtres, caractérisés par une texture argilo-sableuse et par une structure polyédrique très grossière délimitée par des fentes de retrait fines (0, 3 cm) et distantes de 10 à 50 centimètres. Il est vraisemblable que l'écoulement s'effectue d'abord dans ces macrovides fissuraux à partir desquels l'eau diffuse lentement dans les agrégats. A la cessation de cet écoulement rapide correspond la fermeture des fentes de retrait qui ne sont presque plus visibles dans le sol humide.

Entre ces cas typiques, des comportements hydriques et des caractéristiques morphologiques intermédiaires caractérisent les horizons B 1 des sols de transition et des sols rouges cultivés.

Aucune particularité du fonctionnement hydrique n'est toutefois mise en évidence par l'interprétation des mesures globales d'humidité dans d'autres horizons qui présentent cependant les indices très nets d'une évolution hydromorphe : il s'agit ici des horizons B 21, B 22 et B 3 de sol beige, caractérisés par la présence de "concrétions" au sommet, qui passent progressivement à des nodules de formes irrégulières envahis par des taches blanchâtres et ocres, donnant plus en profondeur une hétérogénéité de couleur comparable à celle d'un pseudogley. Dans ces horizons les mesures d'humidité faites durant une année dont la pluviosité est supérieure à la moyenne (1964) n'ont mis en évidence que des engorgements faibles et limités dans le temps.

Plusieurs hypothèses permettraient d'expliquer l'apparente contradiction entre les caractères morphologiques et les résultats des mesures d'humidité :

- L'une d'entre elles consisterait à attribuer une origine ancienne à ces indices d'hydromorphie, témoins de la fluctuation de nappes et de niveaux d'engorgement aujourd'hui disparus. Les observations faites par SEGUY (1969) qui constate qu'en 17 années d'exploitation continue, les sols rouges ferrallitiques sans taches décrits par FAUCK sous forêt (1955) se sont transformés par développement simultané d'une cohésion très marquée dans les horizons AB et B 1 et apparition de taches et nodules (comparables à ceux des sols de transition) dans l'horizon B 2, plaident, dans ce cas, en faveur d'une évolution actuelle de la pédogénèse, dépendante des

conditions hydriques modifiées par la mise en culture

- Il se pourrait également que ces concrétions taches et nodules soient liées à des dynamiques de l'eau, localement différenciées en fonction de l'organisation et en particulier de la porosité du matériau (AUDRY et al. 1973), et/ou encore induites par le fonctionnement hydrique de l'horizon supérieur (écoulement très rapide et irrégulier puis progressivement ralenti dans l'horizon B 1). En considérant les données globales d'humidité, nous avons supposé, en effet, que l'eau était régulièrement répartie dans un matériau supposé homogène. Or, les observations morphologiques faites sur le terrain font apparaître le système poreux de ces niveaux comme étant, à l'inverse, caractérisé, non seulement par l'hétérogénéité de sa répartition, de ses formes et de ses dimensions, mais encore par la présence de nombreuses discontinuités, marquées par des contacts brutaux entre différents types d'assemblages, abondamment représentés dans le matériau ("concrétions", nodules, argilanes, pédotubules, matrice).

Les travaux de GRAS (1972) ont montré qu'au niveau des contacts entre deux phases d'un mélange hétérogène, le passage de l'eau d'une phase dans l'autre était sous la dépendance des succions respectives exercées par l'une et l'autre, déterminées par les caractéristiques de leurs systèmes poreux (dimensions, mouillabilité des parois), mais aussi des modalités géométriques de leurs raccordements (recouvrement des courbes de distribution) . Ainsi, toute discontinuité serait susceptible de constituer une barrière assurant dans certaines zones le maintien d'une humidité relativement stable par rapport à celle du milieu qui les contient.

Les domaines dont la macroporosité est la plus faible (particulièrement les argilanes) situés au contact des vides grossiers empruntés par l'eau, seraient ainsi les plus exposés à la saturation et à l'asphyxie. Les valeurs globales relativement stables des humidités correspondraient alors, non pas à la capacité au champ (selon le concept normal appliqué à un matériau homogène) mais à un équilibre relatif réalisé entre les succions exercées par les différentes phases, portées à des humidités inégales et susceptibles d'évoluer dans des conditions physico-chimiques différentes.

Seule une analyse plus fine des modes d'assemblages élémen-

taires, faisant appel en particulier aux techniques de la micromorphologie, peut, dans ce domaine, apporter une meilleure connaissance de la dynamique de l'eau qui commande les processus de la pédogénèse.

4/ - Conclusions.

L'interprétation des mesures globales d'humidité, faite à la lumière des données climatiques correspondantes, fournit quelques indications essentielles pour l'étude de la pédogénèse :

- Nous savions que la pluviosité durant la saison humide dépassait l'E. T. P. de près de 500 millimètres (cf. chap. 2). Il apparaît maintenant que seule une partie de cette eau excédentaire (200 à 250 mm) est stockée dans la couche de sol comprise entre 0 et 2 mètres, tandis que le restant est drainé à plus grande profondeur et/ou écoulé latéralement.

- Exposés à ces apports d'eau surabondants les sols réagissent de façons différentes sous un même couvert végétal : alors que l'eau "libre" s'écoule de façon régulière vers la profondeur durant toute la saison des pluies dans le sol rouge, sa pénétration très rapide et localisée dans le sol beige se ralentit par la suite, provoquant la formation d'engorgements dans l'horizon B 1. L'amplitude plus grande et le décalage dans le temps des variations du stock d'eau serait une conséquence de cette évolution.

- La période durant laquelle le drainage est possible à plus de 2 mètres de profondeur se poursuit quelques jours après les dernières pluies dans le sol rouge, elle semble être, à l'inverse, interrompue deux semaines plus tôt dans le sol beige, alors que se développent des engorgements dans les horizons B 1 et A, manifestant une limitation dans le temps des possibilités d'écoulement vertical de l'eau.

- La mise en culture provoque dans le sol rouge le développement d'engorgements localisés dans les horizons B 1 et AB comparables à ceux décelés dans le sol beige sous forêt.

- Les caractères d'hydromorphie propres aux horizons B 21, B 22 et B 3 de sol beige ne sont reliés à la présence d'aucune nappe ni engorgement actuels décelables par les mesures globales d'humidité mais

semblent résulter d'une dynamique de l'eau particulière aux milieux hétérogènes soumis à une humectation irrégulière.

D - ESSAIS DE COMPORTEMENT DES MATERIAUX SOUMIS A L'ACTION DE L'EAU (méthode "VERGIERE").

Ayant mis en évidence des différences entre les régimes hydriques des sols, rouge et beige, sous un même couvert végétal, et constaté qu'elles se manifestent sans qu'aucun écoulement latéral les ait précédé, nous sommes conduits à en chercher l'origine dans les caractéristiques propres aux profils pédologiques. Or chacun d'eux, constitué par la succession verticale d'horizons, fonctionne à la manière d'un filtre complexe. Afin d'apprécier les interactions qui y sont exercées, il est nécessaire de décomposer l'ensemble et d'évaluer les caractéristiques intrinsèques des matériaux pédologiques libérés de l'environnement auquel ils sont normalement soumis dans le profil. Tel est l'objectif des essais de comportement dont les modalités et les résultats sont exposés ici.

1/ - Méthode utilisée.

Réalisée en collaboration avec TOBIAS (1968), cette étude utilise la méthode mise au point par la station de VERGIERE (BOURRIER, 1965).

Elle porte sur 216 blocs de terre cubiques de 10 centimètres d'arête, découpés à la scie à partir de 6 monolithes sectionnés en 9 niveaux de profondeur. Chacun d'eux est placé dans une boîte métallique ouverte sur deux faces opposées, l'étanchéité entre le cube et la boîte étant obtenue en coulant de la paraffine.

L'échantillon mis en place dans l'appareil est d'abord réhumecté per ascensum, par capillarité, de façon à éliminer l'air inclus (le temps nécessaire est de l'ordre de lheure pour les échantillons de sol rouge, de 8 heures pour les échantillons de sol beige les plus compacts). Le cube est alors seulement placé sous une charge constante de 12 centimètres d'eau. La vitesse de filtration, calculée selon la formule de DARCY est ici exprimée en centimètres/heure. Evaluée dans les conditions propres à l'expé-

rience, elle correspond, en fait, à un indice de perméabilité désigné par la lettre K.

2/ - Résultats.

Trois sortes d'indications sont fournies par cet essai de comportement :

a) Les premières, d'ordre qualitatif, ont trait à la turbidité des liquides percolés, indice de leur charge solide.

Les indications relatives à la turbidité de l'eau percolée à travers les blocs de terre sont rassemblées dans le tableau 8-3. Il apparaît :

- que la mise en dispersion spontanée des colloïdes dans les conditions expérimentales n'affecte que la partie la plus superficielle des 2 sols.

Tableau 8-3.

TURBIDITE DES LIQUIDES PERCOLES.

SOLS / HORIZONS	ROUGE (forêt)		BEIGE (forêt)	
	TROUBLE	COULEUR	TROUBLE	COULEUR
A	+ +	rouge orangé	+ + +	brun pâle
A B	+	"	+ +	"
Sommet de B 1 (45 - 55 cm)	0	-	+	"
B 1	0	-	0	-

- qu'elle est plus importante et atteint une profondeur plus grande dans le sol beige.

- que les horizons intéressés sont précisément les plus appauvris en argile (les autres ne laissant s'écouler qu'une eau limpide).

Signalons par ailleurs que le trouble est toujours plus accusé au début et qu'il diminue progressivement au cours de l'essai.

b) D'autres résultats correspondent aux vitesses de filtration mesurées après 3 heures d'écoulement (afin d'obtenir la stabilisation relative du débit).

Les valeurs exceptionnellement élevées, supérieures à 200 centimètres/heure, ont été éliminées pour cause pratique (le dispositif utilisé ne permettant pas la mesure des débits correspondants), elles résultent toujours de l'existence de larges chenaux dus à l'activité biologique. De même, les volumes contenant des fissures importantes n'ont été ni prélevés, ni à plus forte raison soumis à des mesures. De ce fait une partie de la porosité "en grand" de certains horizons n'est pas prise en compte.

Les valeurs moyennes obtenues sont rassemblées dans les tableaux 8-4 et 8-5 ; elles sont également représentées graphiquement sur la figure 8-8 sur laquelle sont également portées les maximales et minimales.

Tableau 8-4.

VITESSES DE FILTRATION DANS LES ECHANTILLONS DE SOLS MAINTENUS SOUS FORET.

PROFONDEUR (cm)	SOL ROUGE	SOL BEIGE
0 - 10	74	84
15 - 25	75	59
30 - 40	15	114
45 - 50	13	30
70 - 80	17	5
100 - 110	18	7
150 - 160	18	10
200 - 210	23	8

Dans les échantillons de sols maintenus sous végétation forestière, la principale différence mise en évidence porte sur les variations verticales, particulièrement marquées dans les horizons A, AB et B 1, importantes dans le sol rouge malgré son apparente homogénéité (de 75 à

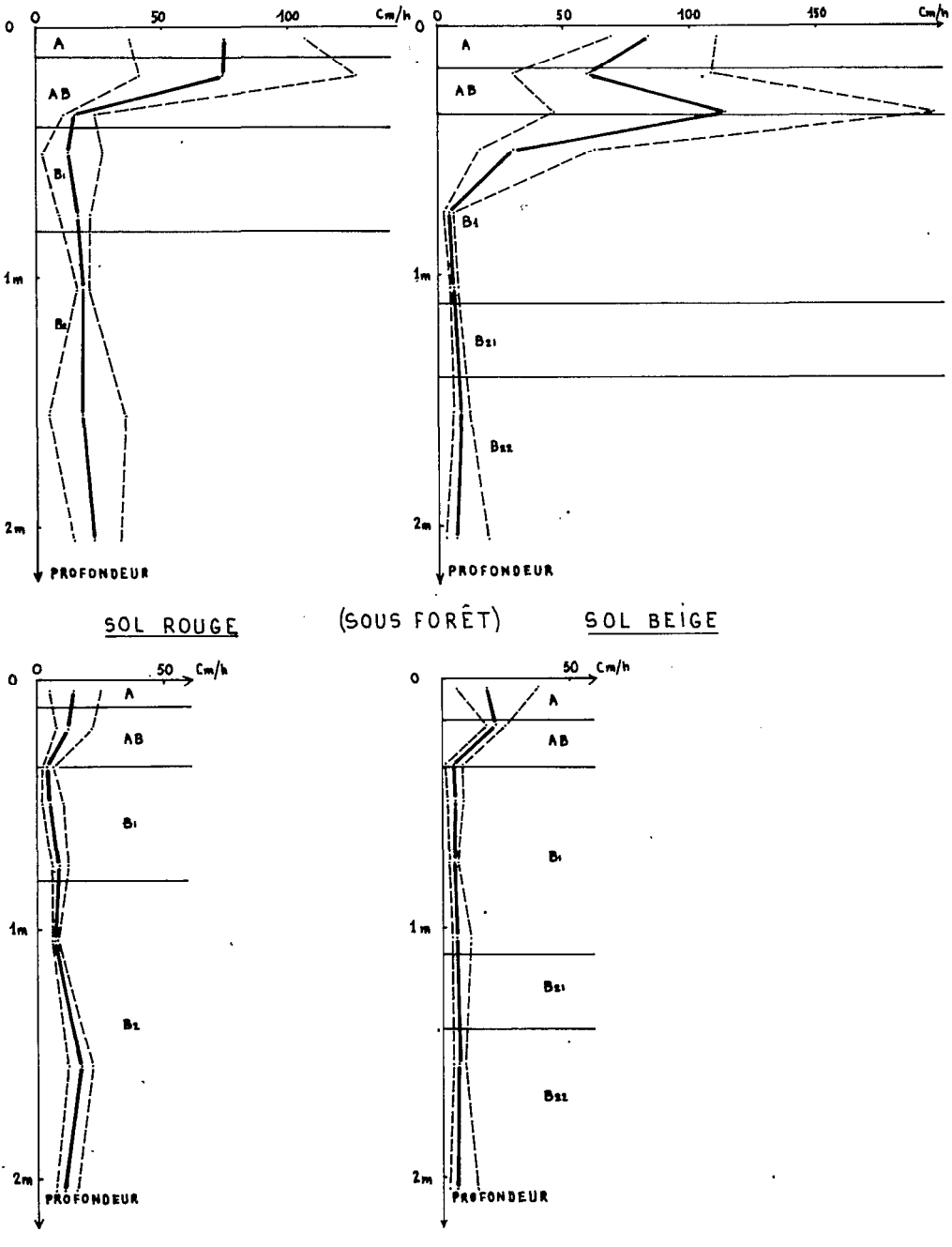


Fig. 8-8 - Valeurs moyennes, minimales et maximales de la vitesse de filtration.

13 soit un rapport de 6 à 1), beaucoup plus accentuées encore dans le sol beige (de 114 à 5 soit un rapport de 23 à 1). Dans les deux sols les valeurs sont élevées dans les horizons superficiels et présentent un minimum dans l'horizon B 1. Dans le beige seulement, un niveau de très forte perméabilité marque le passage de l'horizon AB à l'horizon B 1. De telles variations sont de nature à expliquer l'apparition d'engorgements dans la partie superficielle des profils.

Une partie des résultats obtenus sur les échantillons de sols cultivés de Séfa est rassemblée dans le tableau 8-5.

Tableau 8-5.

VITESSES DE FILTRATION DANS LES ECHANTILLONS DE SOLS CULTIVES.

PROFONDEUR (cm)	SOL ROUGE	SOL BEIGE
0 - 10	14	18
15 - 25	12	22
30 - 40	4	4
45 - 50	5	6
70 - 80	8	4
100 - 110	7	6
150 - 160	17	6
200 - 210	10	6

Dans le sol rouge l'effet de la mise en culture se manifeste de façon évidente par une limitation considérable de la vitesse de filtration dans toute la partie supérieure du profil (ensemble des horizons A, AB, B 1 et sommet de B 2) bien au-delà de la profondeur atteinte par les façons culturales. Les valeurs minimales (au sommet de l'horizon B 1) sont alors identiques à celles qui caractérisent le sol beige maintenu sous forêt.

Le sol beige cultivé présente des caractéristiques comparables à celles du rouge (l'effet de la mise en culture étant, là encore, d'uniformiser

les caractéristiques des sols). Comparé à son homologue maintenu sous forêt, il en diffère surtout par une très forte limitation de la vitesse de filtration de 0 à 70 centimètres de profondeur (la vitesse de filtration étant assez peu modifiée au-delà). Opérant sur des échantillons plus petits (cylindres de 7 à 8 cm de rayon) et sous une charge moindre, COINTEPAS (1960) avait déjà mesuré des vitesses de filtration encore inférieures dans ces sols cultivés (de l'ordre de 0, 5 cm/heure dans les horizons superficiels et de 0, 5 cm/jour dans l'horizon B 1).

La répétition de prélèvements à quelques mètres de distance, en fonction du microrelief, montre que les valeurs obtenues diffèrent sensiblement d'un point à l'autre (allant jusqu'à s'annuler totalement dans les échantillons prélevés de 30 à 50 cm). Ainsi se crée une hétérogénéité de comportement hydrique, à l'échelle de quelques mètres, en relation avec le nivellement des surfaces cultivées, responsable de la formation de mares temporaires au cours de la saison des pluies.

Les relations entre ces vitesses de filtration (K) et les caractéristiques des systèmes de porosité propres à chaque horizon des sols étudiés sont susceptibles de nous renseigner sur l'origine des variations observées.

Si les valeurs de K sont pratiquement indépendantes de la porosité totale, elles semblent être davantage liées à la macroporosité et à la porosité "structurale". L'allure générale des graphiques représentés sur la figure 8- 9évoque la relation établie par KOZENY (1932) selon laquelle la fraction de volume-unité accessible à l'eau en mouvement (proche de la macroporosité) intervient à la puissance 3 dans le calcul de K (HENIN, 1960). La forte diminution de la vitesse de filtration, au niveau de l'horizon B 1, qui marque le passage des sols rouges aux sols beiges sous forêt, et qui résulte de la mise en culture, apparaît donc comme étant une conséquence de la limitation de la porosité grossière. Il conviendra d'en étudier les raisons à l'échelle microscopique.

Lorsque dans un filtre complexe la vitesse tend vers 0 dans un niveau, le débit de l'ensemble en fait de même. C'est donc la couche la moins perméable qui impose alors ses limitations. Dans les sols étudiés, les valeurs minimales de K sont situées dans l'horizon B 1 ; il semble donc que toute évolution du système de porosité de cet horizon soit susceptible

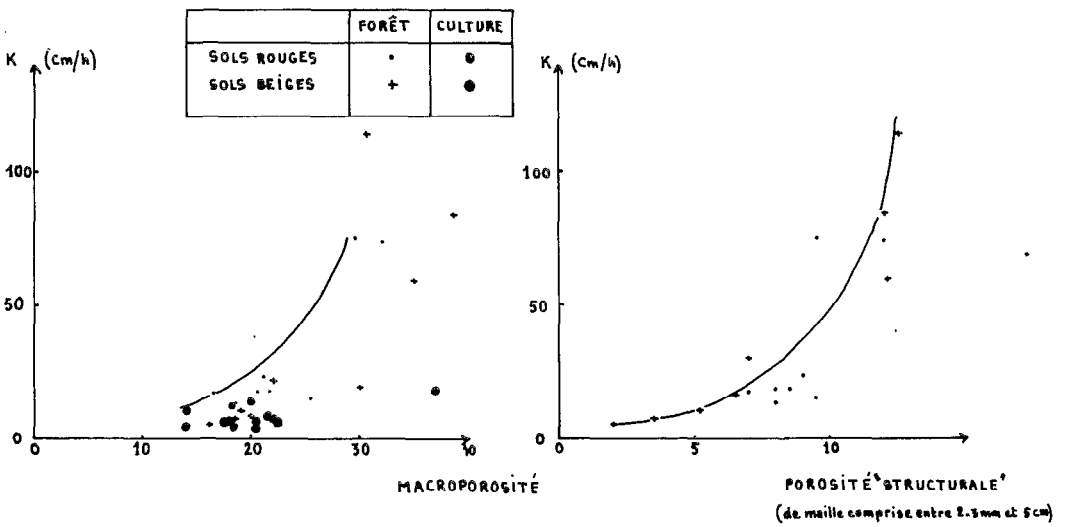


Fig. 8-9 - Relations entre la vitesse de filtration et la porosité grossière.

(Macroporosité = Porosité totale - Humidité vol. à la capacité au champ et Porosité "Structurale" de maille comprise entre 2, 3 mm et 5 cm).

de se répercuter sur le fonctionnement hydrique au-dessus (en développant des engorgements) et au-dessous (en imposant ses variations d'écoulement dans le temps et dans l'espace).

c) D'autres données, enfin, portent sur les variations de la vitesse de filtration en fonction du temps.

Portant en abscisse le temps et en ordonnée les vitesses de filtration, nous avons établi les courbes de la figure 8-10qui sont caractéristiques des sols rouges ou des sols beiges.

- Les premières indiquent une vitesse de percolation stable ou qui s'accroît progressivement en fonction du temps.

- Les secondes, à l'inverse, révèlent une décroissance, d'abord relativement rapide (durant 3 à 10 heures) puis moins forte (ou nulle lorsque le vitesse est elle-même faible), se poursuivant au-delà de 48 heures.

Des diminutions semblables ont été mises en évidence par COINTEPAS (1960) qui les considère comme étant caractéristiques des horizons superficiels de sols cultivés (de 0 à 40 cm) et constate qu'elles ne se manifestent qu'au bout d'un temps variable après la mise en eau (12 à 36 heures, sans préhumectation). Il attribue cette évolution à la destruction progressive de la structure du sol, transformé en boue au sommet de l'échantillon.

Nous constatons ici que cette évolution ne se manifeste pas dans le sol rouge sous forêt, mais qu'elle se généralise à l'ensemble du profil de sol beige.

L'interprétation de ces deux comportements opposés doit être recherchée dans l'étude de la réaction des matériaux soumis à l'action de l'eau. Il y a lieu de signaler à ce propos que le temps de préhumectation est relativement court (quelques heures) par rapport à la durée des mesures (2 jours). Les processus de gonflement (qui engendrent la déformation et la limitation des pores), de dissociation et de dispersion (qui modifient le mode d'assemblage et la distribution des constituants) sont donc susceptibles de se poursuivre au cours de l'essai. Cette réaction s'exercerait différemment dans les matériaux pédologiques selon qu'ils proviennent de sols rouges sous forêt, ou de sols beiges.

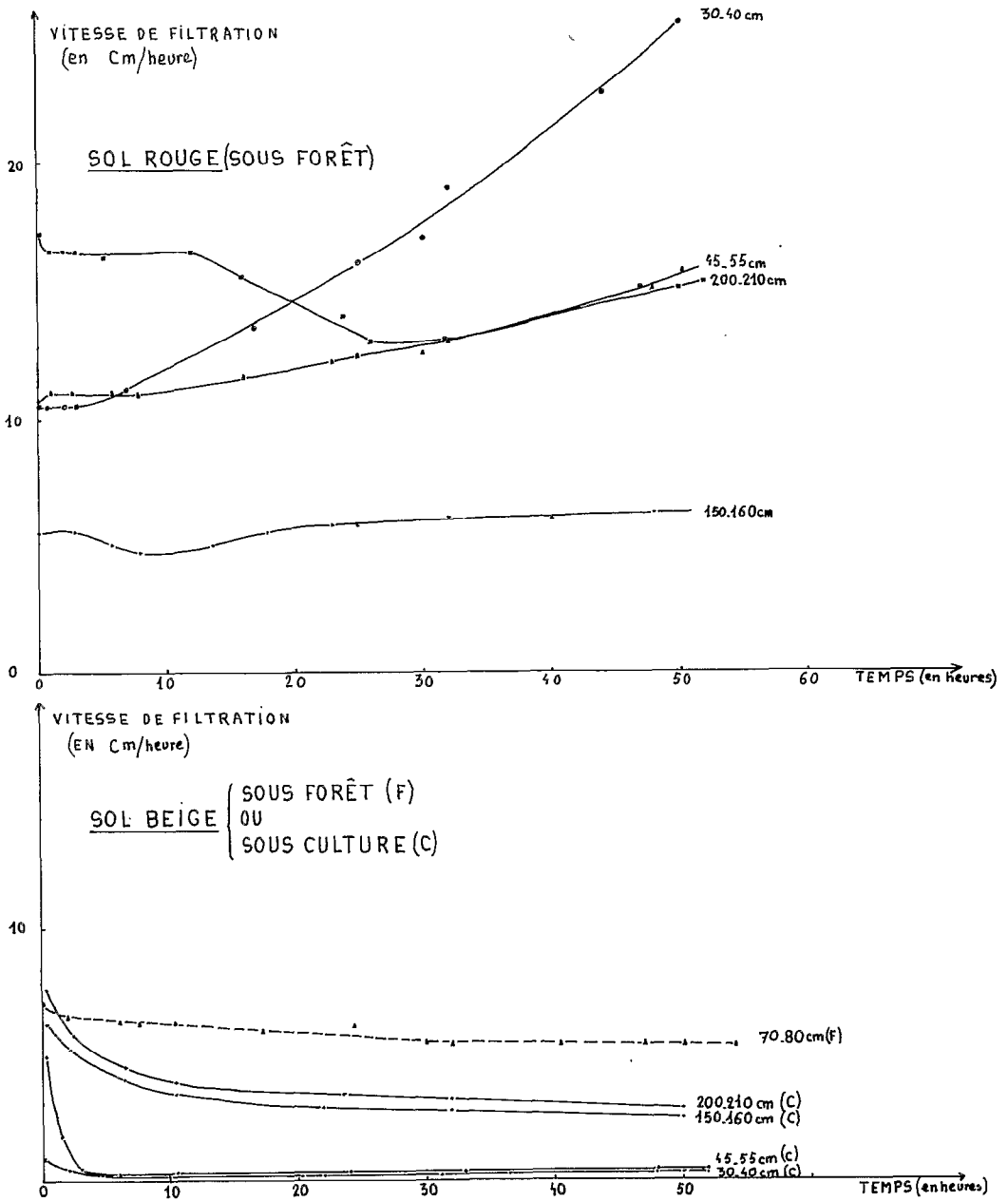


Fig. 8-10 - Allure générale des courbes de variation de la vitesse de filtration, en fonction du temps, dans les matériaux de sols rouges et beiges.

Les différences observées peuvent être mises en relation avec les écarts de comportement décelés dans les sols en place soumis aux conditions naturelles : dans le sol rouge sous forêt, le drainage se poursuit de façon régulière durant toute la saison des pluies ; tandis que dans le beige, après une pénétration rapide et profonde de l'eau provenant des premières précipitations, les possibilités d'écoulement se réduisent progressivement durant la saison des pluies, provoquent l'apparition puis l'aggravation des phénomènes d'engorgement. L'échelle de temps est certes différente entre les mesures faites au laboratoire et le cycle des saisons. Il n'en reste pas moins vrai qu'une convergence semble ici se manifester.

3/ - Conclusions.

De cet essai de fonctionnement de blocs de terre, isolés du profil pédologique et soumis à l'effet d'une charge d'eau déterminée, nous retiendrons principalement 4 conclusions :

1) La mise en dispersion spontanée des colloïdes du sol et leur entrainement par percolation ne se produit que dans les horizons "appauvris" ; elle est plus importante et affecte une profondeur plus grande dans les sols beiges que dans les rouges. Cette caractéristique semble être à l'origine des phénomènes d'éluviation qui seraient ainsi précédés par une phase préparatoire, donnant naissance à une "fraction argileuse facilement exportable" (CHAUVEL et CHARREAU, 1972).

2) Les variations verticales de l'indice K ne sont importantes dans le sol rouge que dans les horizons A et AB, elles atteignent leur plus forte amplitude dans le sol beige où se différencient deux niveaux aux comportements extrêmes (très perméable à la base de l'horizon AB, très imperméable au milieu de l'horizon B 1), elles sont dans tous les sols fortement réduites par la mise en culture qui tend à uniformiser les valeurs de K à un faible niveau sur l'ensemble du profil (provoquant l'apparition et le développement du ruissellement).

3) Les variations de la vitesse de filtration en fonction du temps révèlent la stabilité des vitesses d'écoulement à travers les horizons de sol rouge sous forêt et leur décroissance progressive dans les échantillons de sol beige. Elles résultent des réactions différentes des matériaux à l'action de l'eau, dont il conviendra de rechercher les causes.

4) Dans tous les profils étudiés, la plus forte limitation des possibilités d'écoulement intervient au niveau de l'horizon B 1. Les caractéristiques de cet horizon semblent donc exercer une action déterminante sur le fonctionnement hydrique de l'ensemble du profil.

CONCLUSIONS GENERALES.

L'étude des caractéristiques porosimétriques et dù fonctionnement hydrique des sols a été orientée en fonction des observations faites sur le terrain qui ont mis en évidence des différenciations morphologiques, latérales et verticales, à l'échelle du paysage comme à celle du profil.

Les caractères mis en cause ont été par la suite quantifiés par les méthodes analytiques, sans toutefois que celles-ci nous renseignent sur l'origine même de leurs variations.

Au cours de ce chapitre, l'aspect dynamique de l'évolution des sols a été abordé : ainsi les mesures faites révèlent qu'à la différenciation des caractères morphologiques correspond celle du fonctionnement hydrique actuel (à toutes les échelles d'investigation) profondément modifié par la mise en culture.

Soumis à des apports d'eau largement excédentaires au cours de la saison des pluies, la couche de sol comprise entre 0 et 2 mètres réagit de façons différentes selon les cas, assurant le drainage régulier en profondeur de la plus grande partie de l'eau "libre" dans le sol rouge maintenu sous forêt au sommet de la toposéquence, limitant son écoulement au niveau de l'horizon B 1 dans le sol beige situé à l'aval et dans les sols cultivés, ce qui a pour effet de provoquer l'engorgement et éventuellement l'écoulement latéral subsuperficiel de l'eau (dans le premier cas), ou de déclencher un ruissellement intense (caractéristique des sols cultivés). Cette redistribution localisée de l'eau semble donc être, ici, la conséquence plus que le facteur de la différenciation pédologique.

Ceci nous conduit à nous interroger sur le rôle exercé par l'eau dans l'évolution de ces sols. Si dans les sols rouges, en effet, les données rapportées paraissent exprimer un équilibre stable entre la morphologie et la dynamique actuelle, assurant la conservation et l'entretien des

organisations ; dans les sols beiges (et dans les sols rouges cultivés), à l'inverse, elles traduisent une évolution qui tend à accentuer les différenciations observées et les écarts de comportement par rapport au sol rouge.

Le problème est de savoir si la dynamique de l'eau, apparemment subordonnée à la différenciation pédologique, n'en devient pas le facteur à partir du moment où celle-ci est amorcée par l'effet d'une rupture d'équilibre. Pour répondre à cette question, il importe de reconstituer l'histoire récente des sols en étudiant leur organisation, particulièrement au niveau du passage des sols rouges aux sols beiges.

Chapitre 9

LES DONNEES DE L'ANALYSE MICROSCOPIQUE

INTRODUCTION -

a) Objectifs.

Entre les 3 sols étudiés (rouge, de transition et beige), les données analytiques ont montré qu'il n'existait pas de changements notables dans la composition minéralogique globale, mais que les différences portaient essentiellement sur l'organisation des constituants, en relation avec le fonctionnement hydrique des matériaux.

Les observations faites sur le terrain ont déjà montré que les variations de l'organisation sont ordonnées dans l'espace à différentes échelles (depuis celle de la région et du paysage jusqu'à celle des horizons pédologiques). Il convient maintenant de compléter cette analyse par une étude plus fine, au niveau de l'assemblage élémentaire des constituants.

L'analyse micromorphologique peut nous montrer si ces variations sont également ordonnées dans le temps, en mettant en évidence les filiations, c'est-à-dire l'ordre et la nature des transformations de la structure qui assurent la succession des différentes organisations.

Cette étude chronologique nous conduit à aborder le problème de la dynamique actuelle des sols en recherchant les relations qui existent entre l'organisation des matériaux et leur comportement vis-à-vis de l'eau.

b) Plan.

Dans ce chapitre, l'analyse microscopique portera d'abord sur les organisations :

- du sol rouge maintenu sous forêt
- du sol de transition et des sols rouges cultivés
- du sol beige.

Elle portera ensuite sur les transformations des sols rouges en sols beiges.

c) Techniques et méthodes.

Près de 200 lames minces ont été taillées dans des échantillons orientés prélevés de façon à caractériser les organisations microscopiques propres à chaque horizon décrit et identifié sur le terrain.

La terminologie utilisée pour la description est celle de BREWER (1964), adaptée à la langue française et présentée récemment par BOCQUIER (1971) et BOULET (1974).

Trois sortes de données seront particulièrement utilisées :

- Les premières sont relatives aux CONSTITUANTS des sols. A leur sujet, nous adopterons, dans une première approche, les définitions données par WACKERMANN (1966) qui appelle :
SQUELETTE "l'ensemble des cristaux de diamètre supérieur à 2 microns". Ce sont ici principalement des quartz et accessoirement quelques minéraux lourds,
et PLASMA "l'ensemble des phases minérales et organiques dont la taille des cristaux échappe au pouvoir de résolution maximum du microscope optique (1 à 2 μ) ". Il s'agit, cette fois, surtout de kaolinite, associée à des quantités variables d'hydroxyde.

- Les secondes portent sur les TRAITS PEDOLOGIQUES, c'est-à-dire sur les unites morphologiques reconnaissables dans les sols qui se distinguent du matériau environnant par leur état, leur concentration ou leur arrangement. Leur formation implique l'intervention de processus

physico-chimiques (tels que la réduction...), de mécanismes de transfert (en solution, en suspension dans l'eau...) ou d'actions biologiques (en particulier celle des termites...). Les relations et l'ordre entre ces trois types de transformation révèlent alors les causes premières et mettent en évidence la succession des processus pédogénétiques. Parmi les "traits pédologiques", il en est qui sont en relation avec le fond matriciel, ils sont dits "AUTHIGENES", et d'autres qui sont en discontinuité avec lui et sont alors considérés comme "RELIQUES".

- Les troisièmes concernent les NIVEAUX D'ORGANISATION

Trois principaux seront ici reconnus, correspondant :

. à la "STRUCTURE PLASMIQUE", c'est-à-dire au mode d'assemblage des particules de dimensions inférieures à 2 μ et des très petits vides qui résultent de leur entassement.

. à la "STRUCTURE DE BASE" ou structure du fond matriciel, c'est-à-dire à la taille, à la forme et à l'arrangement des grains simples (plasma et squelette) et des vides.

. à la "STRUCTURE PRIMAIRE" qui intègre, en plus, les traits pédologiques inclus dans le fond matriciel.

La présentation des données sera faite en distinguant dans chaque profil de sol (rouge, de transition et beige) les deux ensembles suivants, de bas en haut :

- le premier regroupe les horizons B 3 et B 2 dont les profondeurs s'échelonnent entre 5 mètres et près de 1 mètre de profondeur,

- le second, constitué par la superposition des horizons B 1, AB et A (de 1 mètre à la surface) est plus directement influencé par les conditions actuelles d'évolution (pédoclimat, action de la flore et de la faune).

Selon la terminologie proposée par CHATELIN (1972) ces deux ensembles pourraient être appelés respectivement "infrasol" et "apexsol".

A - L'ORGANISATION MICROSCOPIQUE DU SOL ROUGE.

1/ - Analyse microscopique des horizons profonds B 3 et B 2.

Les horizons profonds B 3 et B 2, situés entre 1 et 5 mètres de profondeur, ont été définis macroscopiquement de la manière suivante : horizons rouges, à différenciation verticale très peu apparente, à texture masquée par la dominance de "granules", à structure continue, à sous-structure grenue, friables et fragiles, à formes nodulaires à peine différenciées, entourées par des zonations blanchâtres et recoupées par des agrotubules très peu contrastés.

a) Les constituants.

L'observation microscopique reconnaît deux sortes de constituants : le squelette quartzeux et un plasma composé de kaolinite et d'hydrates ferriques.

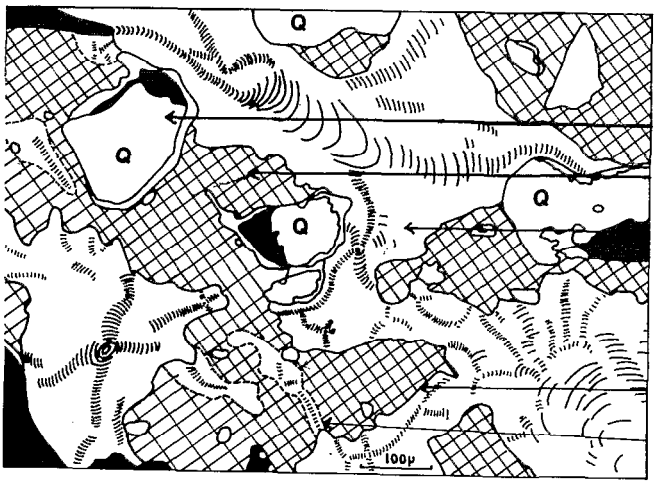
α) Le squelette.

Peu abondant, il n'occupe que 25 % du volume total.

Il est surtout composé de grains de quartz qui présentent des caractéristiques différentes selon leurs dimensions (planche 1 , dessin 1) et qu'il convient de regrouper en 3 fractions :

- grains grossiers à très grossiers ($\phi > 500$ u), de forme subanguleuse à émoussée, fortement fracturés, souvent incrustés d'oxyde de fer rouge violacé, qui souligne le réseau des fissures, isole des fragments (dont l'angle d'extinction reste inchangé) et se prolonge à la périphérie jusque dans les golfes de corrosion qu'il occupe, en discontinuité (pl. 1 , des. 1) avec le plasma environnant d'un rouge plus clair. Cette discordance semble indiquer que les incrustations se sont formées lors d'une autre phase d'évolution ou dans des horizons plus profonds (pl. 1 , des. 1) il s'agirait donc de reliques.

L'abondance de ces grains grossiers s'abaisse dans les zonations blanchâtres dont les quartz, moins chargés d'incrustations se disloquent en éléments plus petits, elle diminue également de façon progressive, de bas en haut par un même effet de fragmentation (consécutive à la dissolution des ciments ferriques).



3 HORIZON B 21

Squelette quartzeux

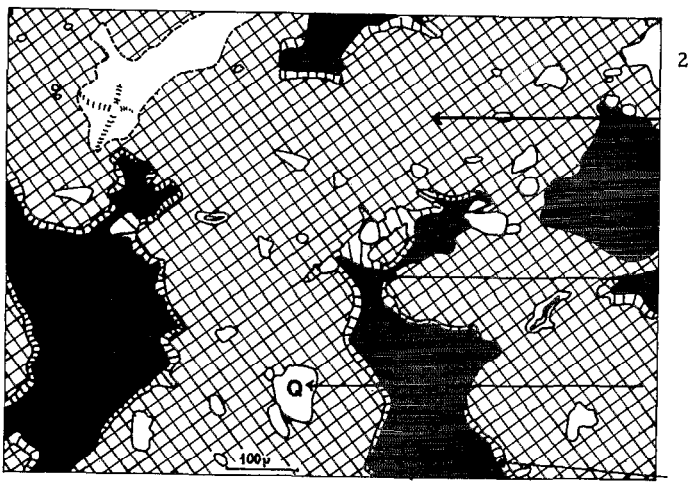
Structure micronodulaire

Argilanes rouges
faiblement orientés
présentant des limites

Nettes

ou diffuses

avec les micronodules



2 HORIZON B 22

Structure

micronodulaire

continue

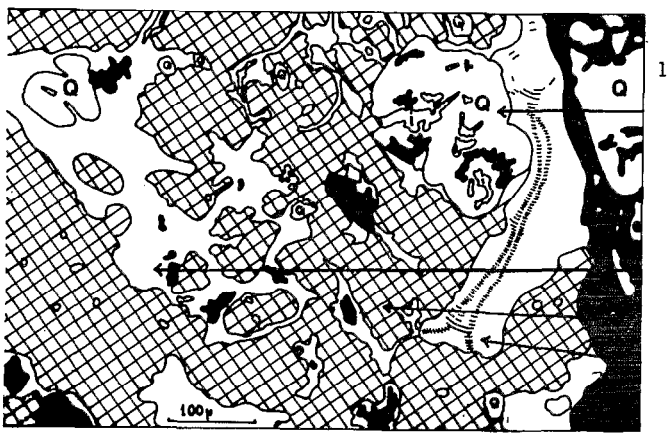
Vides

intermicronodulaires

Squelette

quartzeux

Fins liserés jaunes



1 HORIZON B 3

Squelette

quartzeux incrusté

Plasma

peu dense - fond matriciel

dense - micronodules

clair - Argilanes

Pl. 2. Le sol rouge - Horizons B 2 et B 3.

- grains très fins ($\phi < 50\,\mu$) dont la forme semble être en relation avec la netteté des limites et la limpidité : anguleux (polyédriques ou en "aiguilles") présentant des limites et des extinctions nettes en lumière polarisée, limpides - ou encore arrondis, à limites diffuses avec le plasma, jaunes, ponctués de fines granulations rouge brun, présentant une extinction incomplète (en L. P.). L'abondance de ces quartz très fins diminue également de bas en haut, conséquence, semble-t-il, d'une dissolution d'autant plus active qu'elle affecte des grains plus petits.

- grains de dimensions moyennes ($\varnothing$ 50 à 500 μ) anguleux et plus ou moins arrondis, localement incrustés et fissurés dont la dominance relative s'accroît dans le profil, de bas en haut, en relation avec la différenciation du plasma et plus particulièrement avec l'individualisation des concentrations d'hydrates ferriques.

En conclusion, retenons que la différenciation du squelette quartzeux, dépendante de la fragmentation des grains les plus grossiers et de la dissolution des plus fins, tend à augmenter la dominance relative des grains de dimensions moyennes comme l'a constaté FAUCK (1972). Cette évolution est influencée par celle des incrustations et imprégnations d'oxy-hydroxydes de fer, en relation avec la différenciation du plasma, qui semble exercer une action déterminante sur la pulvérisation des quartz (CHAUVEL et PEDRO, 1967, WACKERMANN, 1975).

Les autres éléments du squelette sont :

- de rares minéraux lourds (zircon) qui ne présentent aucune trace d'évolution particulière.

- des grains d'oxyde de fer petits ($\varnothing$ 10 à 20 μ) et opaques, issus ou non des incrustations contenues dans les quartz, présentant, à fort grossissement des limites diffuses marquées par un passage progressif à une granulation noire et rouge sombre de plus en plus dispersée, indice de leur intégration au plasma.

β) Le plasma.

Beaucoup plus abondant (50 % du volume total), il est constitué de kaolinite et d'oxy-hydrates de fer. On en distingue 3 sortes différentes par leur densité optique et leur orientation (pl. 1 , des. 1) :

- un plasma peu dense, anisotrope, orthoreticulé (bimasé-

pique), rouge jaune, au sein duquel se différencient des globules, dans lesquels sont noyés des grains de squelette (porphyrosquelique).

- un plasma dense, isotrope, sous forme de globules, rouge vif, contenant des grains de quartz dispersés de tailles très diverses (porphyrosquelique).

- un plasma clair, anisotrope, moyennement orienté parallèlement aux surfaces naturelles, ne renfermant que des quartz très fins et des microfragments de plasma rouge.

. Le premier plasma constitue, comme nous allons le voir, le fond matriciel.

. Le second qui, par sa densité et sa perte d'anisotropie, correspond à une concentration du premier, définit des micronodules qui sont les traits pédologiques dominants de ces horizons profonds.

. Le troisième, dépourvu de squelette grossier et orienté en relation avec les vides, en position cutanique, répond à la définition des argilanes (ferri-argilanes homogènes) qui sont également des traits pédologiques.

Il apparaît ainsi que le plasma est largement dominant dans les horizons profonds et qu'il y est surtout présent sous la forme de traits pédologiques que nous allons maintenant caractériser.

Ces derniers s'inscrivent dans 3 organisations caractéristiques :

- la structure micronodulaire continue à l'échelle millimétrique,

- les volumes nodulaires, rares et peu différenciés, à l'échelle centimétrique,

- les organisations d'origine biologique constituées par les agrotubules, également à l'échelle centimétrique.

b) La structure micronodulaire continue.

A la base de la partie du profil considérée (horizon B 3, pl.1 , des.1) les globules de plasma dense, isotrope, rouge vif ($\varnothing$ = 30 à 500 μ) sont en relation avec le plasma clair du fond matriciel : ce sont des concentrations (ou réorganisations) authigènes de certains constituants du plasma (kaolinite-oxy-hydrates de fer) qui forment ici des micronodules (encore appelés "micropeds" ou "microagrégats", séparés avec la fraction sableuse

à l'état de "pseudoparticules" lors de l'analyse granulométrique) ; ces derniers sont entourés localement de liserés jaunes orientés issus d'un changement significatif de l'arrangement des constituants, répondant à la définition des séparations plasmiques. Ces micronodules, anastomosés et assemblés les uns aux autres forment une microstructure continue qui inclut les grains du squelette quartzeux.

Plus haut dans le profil sont observées deux variations de cette microstructure :

- dans l'horizon B 22 (pl. 1 , des. 2) le fond matriciel formé de plasma peu dense disparaît, laissant place à une porosité particulière très développée (vides intermicronodulaires connectés) qui par ses dimensions (comprises entre 5 et 100 µ) se situe à la limite de la micro et de la macroporosité et qui est délimitée par de fins liserés jaunes de plasma orienté.

- dans l'horizon B 21 (pl. 1 , des. 3) ces vides intermicronodulaires sont localement occupés par des argilanes rouges, faiblement orientés, généralement homogènes, présentant des limites avec les micronodules nettes ou au contraire diffuses, indices d'une intégration et d'une réincorporation aux micronodules.

Il ressort de ces observations que les plasmas reconnus sont divers mais présentent d'étroites relations :

- ainsi le plasma peu dense constitue le fond matriciel au sein duquel se différencient les micronodules délimités par des séparations plasmiques.

- après sa disparition, la structure micronodulaire formée laisse place à des vides localement réoccupés par des argilanes rouges qui lui sont progressivement réincorporés.

c) Les volumes nodulaires peu différenciés.

Ces volumes, reconnus sur le terrain (formes nodulaires ou "noyaux") se présentent à l'observation microscopique comme des hétérogénéités de la structure micronodulaire à l'échelle centimétrique. Ils n'en diffèrent que par une densité optique plus grande, par une moindre abondance relative des grains de quartz grossiers et par la petitesse des vides.

Ces secteurs s'isolent localement par de fines fissures parfois occupées par des argilanes et par des concentrations périphériques de sables blanchis et de micronodules formant des assemblages granulaires (correspondant aux zonations blanchâtres de la description macroscopique). Leurs dimensions diminuent progressivement de bas en haut ($\varnothing$ compris entre quelques cm et 5 mm) tandis que leurs formes irrégulières tendent à devenir sphériques.

d) Les organisations d'origine biologique : les agrotubules.

Ce sont des chenaux biologiques plus ou moins remplis par des grains de squelette et de plasma, (ces derniers constitués par des micronodules rouges plus petits et arrondis que ceux de la structure micronodulaire) formant un assemblage lâche de grains libres. Ils sont très peu contrastés, plus nombreux et régulièrement répartis vers le haut (occupant près de 20 % du volume total de l'horizon B 2). Ils recoupent indifféremment toutes les organisations précédemment décrites et leur sont donc postérieures. Leurs parois ne sont ni décolorées, ni revêtues d'argilanes.

e) Conclusions : relations génétiques et niveaux d'organisation dans les horizons profonds.

- Le fond matriciel, présent à la base de ces horizons se caractérise par la rareté du squelette et par la structure de son plasma qui est bimasépique. Dans ce fond matriciel se différencient des micronodules isotropes. Leur disposition au sein du fond matriciel anisotrope, dont ils sont séparés par un liseré d'argile jaune orientée suggère leur différenciation en place par une modification de l'état d'association des constituants (oxy-hydrates de fer et kaolinite) assimilable à une concentration plasmique.

- Vers la partie supérieure de ces horizons, le fond matriciel disparaît, ne laissant en place qu'une structure continue micronodulaire résiduelle (qui représente ainsi une maille d'organisation de 1er ordre). La très forte macroporosité qui en résulte constitue alors une structure d'accueil pour des argilanes rouges qui s'incorporent aux micronodules. Il y a donc succession de processus d'illuviation et d'intégration.

- La structure micronodulaire, ainsi rechargée, se densifie dans certains secteurs. Ceux-ci s'individualisent partiellement par des

fissures et constituent des volumes nodulaires (qui représentent une maille irrégulière de deuxième ordre).

- Les actions biologiques se manifestent par la formation d'agrotubules qui recoupent les autres structures, elles sont donc secondaires ; leur effet est d'homogénéiser le matériau sans modifier toutefois l'organisation des constituants.

- La différenciation verticale de la granulométrie du squelette se manifeste par la prédominance accrue, le bas en haut, des grains de dimensions moyennes ($\varnothing$ 50 à 500 u), conséquence de la fragmentation et de la dissolution des quartz, après incrustation et imprégnation par les oxy-hydrates de fer (en relation avec la différenciation du plasma).

2/ - Analyse microscopique des horizons supérieurs B 1, AB et A, constituant l'apexsol.

Compris entre 1 mètre de profondeur et la surface, ces horizons passent graduellement, de bas en haut, de la couleur rouge (B 1) au rouge sombre (AB) puis au brun rouge (A), tandis que la texture argileuse et partiellement masquée par la présence de granules (B 1) devient sablo-argileuse puis sableuse (A) et que la structure polyédrique grossière s'émousse et devient fragile. La transition avec l'horizon B 2 sous-jacent est diffuse et irrégulière, à contraste faible.

a) Les constituants.

α) Le squelette.

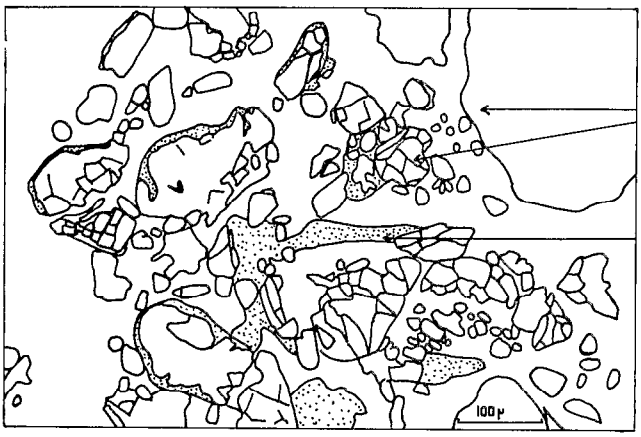
Il devient de plus en plus abondant dès la base de l'horizon B 1, composé surtout de grains moyens fracturés et de petits fragments émoussés.

Dans l'horizon AB, sa distribution est irrégulière, en grappes.

Dans l'horizon A est observé le maximum de fracturation et de dispersion (pl.2 , des. 6), le premier processus paraissant lié à la dissolution des incrustations, le deuxième au brassage par la faune.

β) Le plasma.

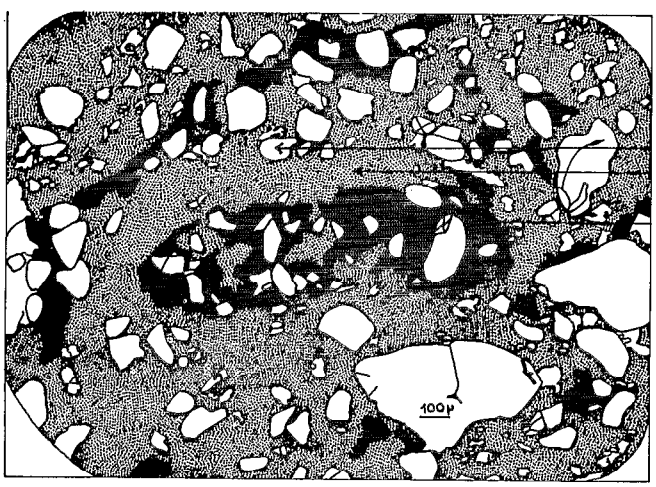
Il devient progressivement moins abondant, tandis que son aspect



6 HORIZON A

Squelette quartzeux dominant
très fracturé
brassé par la faune

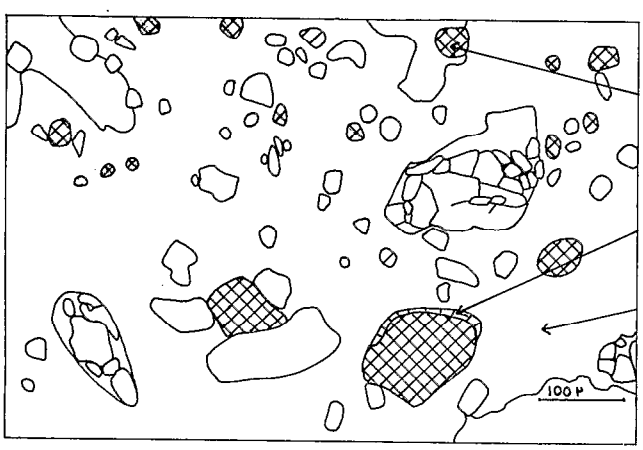
Plasma peu abondant
englobant
des particules
de matière organique
et des micronodules.



5 HORIZON AB

Redistributions
du squelette
et du plasma
autour

des chenaux
biologiques
(néomatranes)



4 HORIZON B 1

Micronodules
isolés
entourés
de fins liserés
d'argile orientée
noyés
dans un fond matriciel
plus clair.

Pl. 3 - Sol rouge - Horizons A, AB et B 1.

et sa composition se modifient :

- dense et isotrope, il apparaît de plus en plus clair et hétérogène à mesure que se raréfient les micronodules,

- s'y ajoutent des ponctuations brunes et noires irrégulièrement réparties (horizon AB), puis des particules noires (horizon A), également constituées de matière organique.

b) La dislocation de la structure micronodulaire continue.

A la base de l'horizon B 1, les micronodules constituent encore une structure continue dans certains secteurs. Les espaces interstitiels y sont, par place, presque totalement occupés par des argilanes rouges peu différenciés. Ailleurs, et plus particulièrement dans la partie moyenne de l'horizon, cette structure se disloque, ne laissant subsister que des micronodules isolés, (pl. 2 , des. 4) entourés de fins liserés d'argile orientée et noyés dans un fond matriciel plus clair. Dans l'horizon AB, ces derniers se raréfient et perdent leurs contrastes.
Dans l'horizon A (pl. 2 , des. 6), ils sont davantage représentés mais plus petits, arrondis, très isotropes (comparables à ceux observés plus bas dans les agrotubules). Ils s'estompent localement, se transforment en halos globulaires et disparaissent.

c) La pédoturbation superficielle (1)

Deux mécanismes différents doivent ici être mis en cause :

L'argillipédoturbation résulte des tensions engendrées par le gonflement et le retrait lors des alternances d'humectation et de dessiccation. Elle se manifeste ici par des séparations plasmiques (ou réarrangements des constituants sans modification de leur concentration), qui apparaissent de façon désordonnée dès que se disloque la structure micro-

(1) Ce mot a été proposé par HOLE (1961) pour désigner les processus de mélange des composants du sol qui ne sont pas attribuables aux phénomènes d'illuviation. JONGERIUS (1970) les a classés en fonction de leur cause, alors indiquée par un préfixe : fauna, argilli...

nodulaire et deviennent localement larges, à limites diffuses, grossièrement orientées selon une ou deux directions privilégiées dans la partie moyenne de l'horizon B 1. Elles disparaissent lorsque la fraction plasmique cesse d'être prépondérante (AB et A).

La faunapédoturbation est exprimée par la présence d'agrotubules. Ces derniers sont rares à la base de l'horizon B 1, ils se développent dans l'horizon AB, et deviennent moins distincts dans l'horizon A surtout caractérisé par l'effet d'un brassage intense par la faune. Cette action affecte partiellement les formes d'association du squelette et du plasma :

- ainsi sont observées des redistributions autour des chenaux biologiques de l'horizon AB (néomatranes) dont les parois sont par la suite recouvertes de fins argilanes (pl. 2 , des. 5).
- ainsi également la remontée des micronodules et leur dispersion mécanique par la faune, s'intensifient dans l'horizon A.

Retenons que la pédoturbation se manifeste :

- par des réarrangements localisés des constituants (séparations plasmiques),
- par le développement d'une macroporosité fragile (agrotubules),
- par l'homogénéisation des matériaux, sans disparition complète, toutefois, du mode d'assemblage des constituants.

d) Conclusions : les transformations dans les horizons supérieurs.

Le phénomène premier, observé dès la base de l'apexsol, est la dislocation de la structure micronodulaire continue et la dissémination des micronodules isolés dans un fond matriciel auquel ils sont progressivement intégrés. Ceci correspond à la transformation de phases isotropes en phases anisotropes. Le fond matriciel ainsi formé, bien que relativement peu abondant, exprime par des réorientations localisées l'effet des tensions engendrées par les alternances de gonflement et de retrait liées aux variations d'humidité à proximité de la surface. La dislocation et la dissémination des micronodules serait ainsi attribuable à un changement de comportement mécanique du plasma dans les conditions plus contrastées de la surface.

Aux effets de cette transformation première s'ajoutent d'autres actions mécaniques dues à la faune qui transporte des constituants (remontée et dissémination des micronodules) et exerce des pressions localisées sur les parois des chenaux (néomatranes).

3/ - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol rouge.

a) Relations avec les autres données analytiques et le comportement du sol en place.

α) Les variations verticales de l'abondance du plasma et des taux d'argile et de fer total.

Il existe entre ces valeurs une concordance approximative. Ainsi dans les horizons B 3 et B 2 les teneurs maximales d'argile relevées en profondeur correspondent aux matériaux dont les espaces intermicronodulaires sont occupés par du plasma clair, une faible décroissance dans l'horizon B 2 semble exprimer la disparition du fond matriciel dans la structure continue, une légère remontée au-dessus de ce niveau est en relation avec la présence d'argilanes rouges, une diminution très nette enfin s'amorce dès la base de l'horizon B 1 (là où se disloque la structure micronodulaire) puis s'accentue fortement à son sommet à mesure que se raréfie le plasma.

Seuls les écarts entre les taux d'argile granulométrique et les appréciations tactiles faites sur le terrain expriment cependant, de façon imparfaite, la répartition du plasma entre les traits pédologiques et le fond matriciel : la première impression entraîne une surestimation des sables et limons et une sous-évaluation de l'argile d'autant plus importante que les micronodules sont plus prépondérants (dans les horizons B 3 et B 2) ; la distorsion s'atténue sans disparaître toutefois dans les horizons B 1, AB et A. On en déduit que la texture de ces matériaux est plus dépendante de l'assemblage des constituants que de leur abondance relative.
Les variations verticales des teneurs en fer "total", sensiblement concordantes avec celles de l'argile granulométrique (fig. 7-1) et du plasma sont un indice du maintien des liaisons entre la kaolinite et les hydrates ferriques dans la plus grande partie du profil. Tout au plus observe-t-on une

proportion à peine diminuée dans l'horizon B 1 et plus élevée dans les horizons A et AB (due à la présence de quelques incrustations résiduelles dans les quartz mélangés à de faibles quantités d'argile).

β) L'évolution du squelette et la granulométrie des sables.

La différenciation verticale du squelette quartzeux est exprimée de façon approchée et globale par les variations verticales de la granulométrie des sables. Celles-ci mettent surtout en évidence la diminution des fractions les plus grossières et les plus fines depuis la base de l'horizon B 3 jusqu'à celle de l'apexsol (en accord avec les conclusions de FAUCK, 1972), puis un léger accroissement des fractions fines dans les horizons AB et A.

γ) Les variations de l'organisation et les mesures de porosité.

Seule est observable au microscope la porosité de diamètre supérieur à 5 ou 10 µ, correspondant approximativement à la porosité accessible à l'air sur la figure 8-3 A. Celle-ci est très élevée dans les horizons profonds (25 % du volume) où elle présente de faibles variations en relation avec l'évidement des espaces intermicronodulaires et avec leur occupation ultérieure par des argilanes rouges ; elle augmente encore dans l'apexsol à mesure que se raréfie le plasma (et que l'assemblage porphyrosquelique devient intertextique puis granulaire lâche).

Un "étranglement" marqué de la porosité accessible à l'air n'apparaît dans l'horizon B 1 que lorsque la partie superficielle du sol se nuance de jaune (fig. 8-3) ; la porosité visible est alors limitée à de rares agrotubules. Hors de cette porosité visible, il semble exister une relation entre l'abondance des micronodules isotropes et le volume de la porosité très fine (cryptovides, ϕ 0,1 u) responsable d'une rétention de l'eau non disponible pour la plante, exceptionnellement élevée dans les sols rouges en regard de la quantité d'eau utile.

δ) Les données relatives au régime hydrique.

Les mesures d'humidité indiquent que de faibles engorgements temporaires et des variations rapides et fortes d'humidité après les dernières précipitations affectent l'apexsol, tandis que les horizons plus profonds sont maintenus au voisinage de la capacité au champ durant toute la saison des pluies et ne cèdent ensuite que progressivement leurs réserves en eau utile. Il est donc vraisemblable que l'effondrement de la struc-

ture micronodulaire soit effectivement dépendante des conditions hydriques.

b) Conclusions sur l'organisation du sol rouge.

Observé au microscope, le sol rouge apparaît ainsi comme étant caractérisé par :

- l'existence d'une microstructure de 1er ordre formée par nodulation, c'est-à-dire ici par concentration (relative et/ou absolue) et réorganisation de certains constituants du plasma (kaolinite et oxy-hydrates de fer) maintenus associés sous forme d'assemblages isotropes par des liaisons interparticulaires. Ces dernières, qui sont susceptibles d'être rétablies après rupture, assurent la pérennité de cette organisation.

- la différenciation à partir de cette microstructure de secteurs plus denses qui tendent à s'individualiser par de petites fissures mais sont réintégrés au fond matriciel par fauna-pédoturbation (ainsi se forment puis disparaissent des ébauches de discontinuité).

- la dislocation localisée de toutes ces structures par des actions biologiques, en particulier par la faune, responsable de la formation d'agrotubules emplis de grains libres (de plasma et de squelette) qui s'effacent ultérieurement à mesure que se résoudent entre eux les micronodules.

- l'effondrement progressif de la microstructure et la dissémination des micronodules au-dessus d'un certain niveau (correspondant à la limite inférieure de l'apexsol), liés au régime hydrique plus contrasté à proximité de la surface, et complétés par des actions biologiques.

A la diversité des mécanismes mis en cause correspond celle des micro-organisations observées, mais leur interpénétration et le maintien ou la reconstitution des mêmes liaisons entre constituants expliquent l'homogénéité apparente et la différenciation faible et graduelle des profils de sol rouge.

B - L'ORGANISATION MICROSCOPIQUE DU SOL DE TRANSITION.

1/ - Analyse microscopique des horizons profonds B 3, B 22 et B 21.

Compris entre 5 et 0,8 mètres de profondeur, ces horizons rouge clair dans leur ensemble, sont formés en grande partie par des nodules d'un rouge plus sombre, séparés du fond matriciel par des discontinuités, contournés (et localement pénétrés) par un réseau dense d'agrotubules partiellement décolorés.

a) Les constituants.

α) Le squelette.

Sensiblement aussi abondant que dans les horizons équivalents du sol rouge (25 % du volume) les grains de quartz sont caractérisés par une fracturation et une distribution dans l'espace plus irrégulières :

- ainsi, les grains grossiers sont d'autant plus incrustés et fragmentés que le matériau dans lequel ils sont inclus est plus imprégné d'oxy-hydrates de fer.

- ainsi également, des grains de dimensions moyennes à fines, groupés en grappes, sont plus largement représentés dans le fond matriciel clair (dont le volume augmente fortement en passant de l'horizon B 3 à l'horizon B 22 puis à l'horizon B 21).

Par ses autres caractéristiques, le squelette est ici semblable à celui du sol rouge.

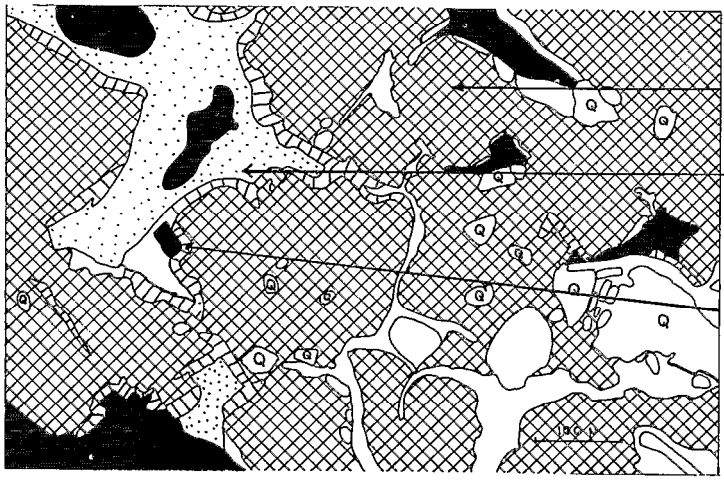
β) Le plasma.

Toujours très abondant (50 % du volume total) mais moins régulièrement distribué, il est surtout remarquable par les variations très étalées de sa densité optique et de son anisotropie,

- très peu dense dans les secteurs décolorés blanchâtres (pl.3 , des.9)

- il l'est un peu plus dans les domaines où il présente une coloration jaune

- sa densité et sa couleur sont localement comparables à celles observées dans le sol rouge

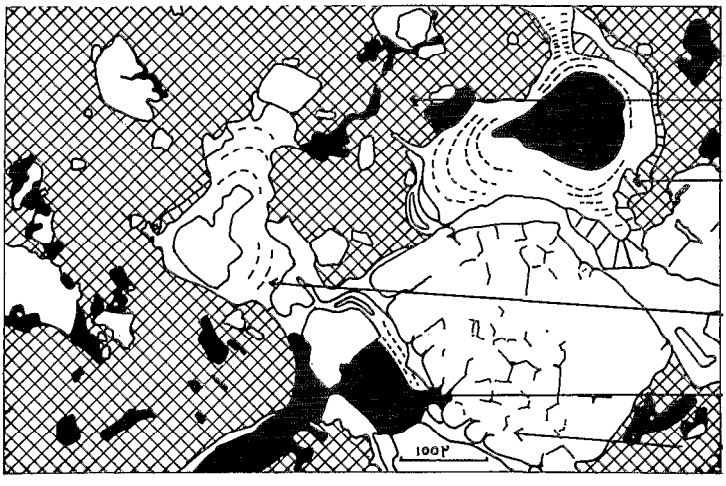


9 HORIZON B 21

Micronodules rouge sombre

Plasma très peu dense dans les secteurs décolorés

Liserés d'argile jaune orientée



8 HORIZON B 22

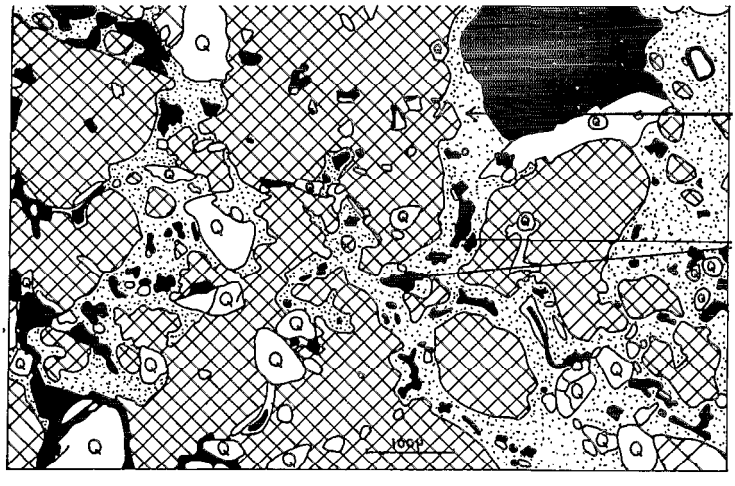
Micronodules très contrastés

Liserés d'argile orientée localement zonés de rouge

Fond matriciel voilé de rouge

Vides

Grains de quartz très fracturés



7 HORIZON B 22

Fond matriciel jaune pailleté laissant place à de nombreux vides.

Pl. 4. Sol de transition - Horizons B 21, B 22.

- il s'opacifie très fortement dans certaines plages qui apparaissent brunes ou noires en lumière naturelle.

Les variations entre ces différents états du plasma sont marquées localement par des transitions graduelles (comparables à celles observées dans le sol rouge), ailleurs par des limites très nettes correspondant à des discontinuités. Elles témoignent de l'intervention de phénomènes de dissociation des constituants du plasma qui définissent ici le sol de transition et caractérisent les transformations du sol rouge en sol beige.

b) Les transformations de la structure micronodulaire continue.

L'observation microscopique révèle ici la présence de la même structure micronodulaire que celle du sol rouge (pl. 3 , des. 9), mais celle-ci subit des transformations qui s'exercent à deux échelles différentes :

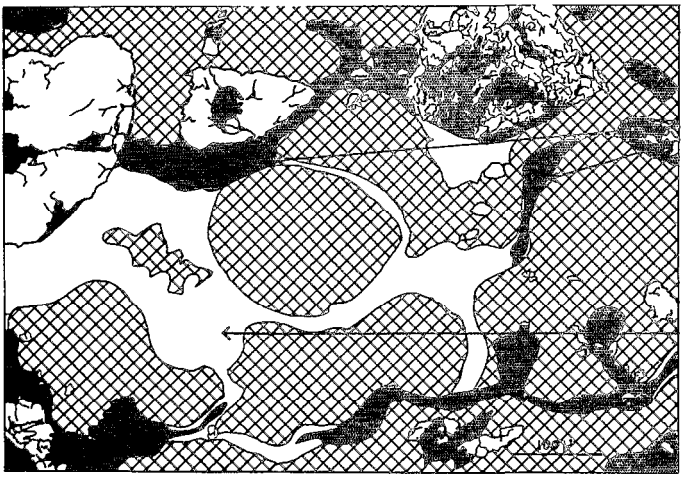
- les premières selon la maille micronodulaire de 1er ordre ($\varnothing$ de l'ordre de 100 μ)
- les secondes selon la maille de deuxième ordre (millimétrique à centimétrique) qui conduit à la formation de nodules rouge sombre dans un fond matriciel plus ou moins décoloré.

α) La transformation des micronodules.

Dans la partie médiane (B 22) de ces horizons inférieurs, les micronodules ne diffèrent de ceux des sols rouges que par leur contraste accru et leur forme plus découpée (pl.3) ; ils présentent des liserés d'argile jaune orientée, localement zonés de rouge au contact des micronodules. Leur fond matriciel jaune pailleté, ou voilé de rouge, ou décoloré et isotrope laisse place à des vides en position médullaire, localement occupés par des argilanes jaune orangé.

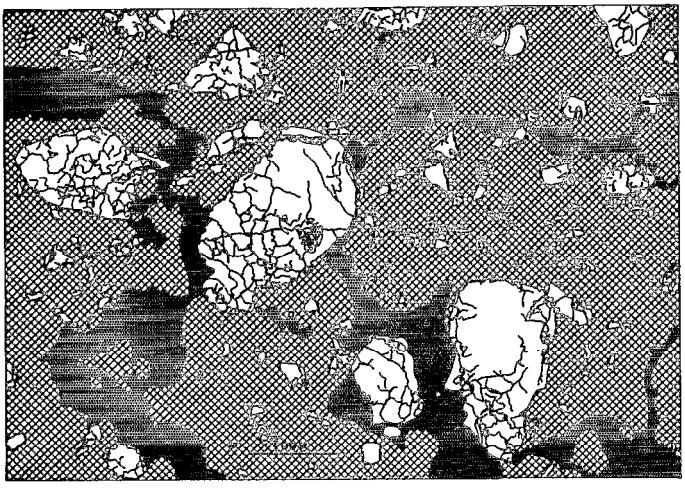
Au-dessus et au-dessous de cet horizon B 22, les micronodules disparaissent par deux transformations différentes :

- au-dessus, dans l'horizon B 21, des volumes qui gardent la trace d'une micronodulation s'opacifient par une imprégnation de fer, plus forte à leur périphérie ; ces volumes nodulaires réalisent ainsi une sorte d'"enkystement" de la structure micronodulaire antérieure; le fond matriciel qui les englobe tend à se décolorer.



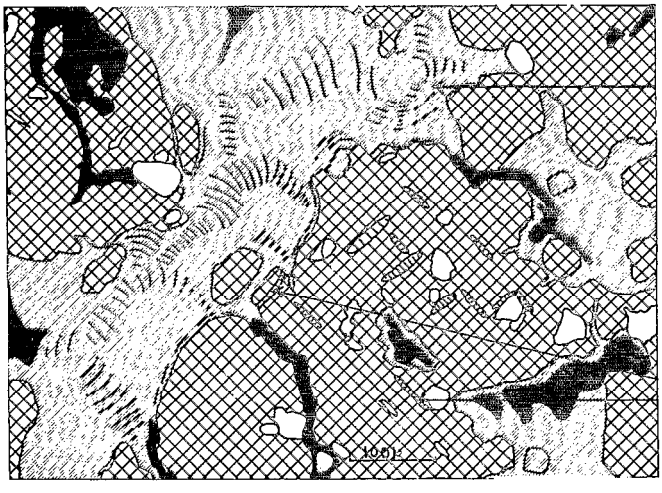
10 HORIZON B 3

Vides
intermicronodulaires
partiellement
occupés
par des ferri-argilanes
rouge jaune



11 BASE DE L'HORIZON B

Imprégnation
ferrugineuse uniforme
Les micronodules
ne sont plus décelables
Tendance
au carapacement



12 HORIZON B 22

Argilanes jaune
orangé
peu différenciés
localement
en continuité
avec les
séparations plasmiques.

Pl. 5. Sol de transition - Horizons B 21, B 22 et B 3.

- au dessous et vers la base de l'horizon B 3, les vides entre les micronodules sont de plus en plus occupés par des ferri-argilanes, (pl. 4 , des.10) rouge jaune, comparables à ceux observés dans le sol rouge, mais plus denses et présentant des zonations jaunes et qui se réincorporent à la structure. Ainsi la base de l'horizon devient massive, rouge sombre par imprégnation ferrugineuse uniforme et les micronodules ne sont plus décelables que très localement dans un matériau qui tend à se carapacer (pl 4, des.11)

La structure micronodulaire se charge donc en fer et s'opacifie, soit dans chacun des micronodules (horizon B 22), soit à la périphérie des volumes nodulaires (horizon B 21), soit dans la masse (horizon B 3).

D'autres argilanes interviennent également dans ces transformations de la structure micronodulaire :

- des argilanes jaune orangé (pl. 4 , des. 12), peu différenciés, présentent des colorations hétérogènes (à nuances rouges), une légère striation et sont faiblement orientés. Ils sont localement en continuité avec les liserés d'argile jaune orientée et les séparations plasmiques dont ils ne peuvent être distingués, remplissant alors la plus grande partie des vides intermicronodulaires.

- des argilanes oranges striés (pl. 5 , des.13) diffèrent des précédents par une coloration plus sombre et des striations plus accusées (ou zonations) on les trouve dans les secteurs de matériau rouge opacifié ; leurs limites avec ce dernier sont sinueuses, irrégulières et localement diffuses.

La couleur et l'hétérogénéité de ces argilanes semblent résulter d'une dissociation des constituants du plasma. Leur interpénétration ou leurs limites diffuses avec les micronodules opacifiés indiquent qu'ils sont formés en place par réorientation des fractions les plus mobiles, relativement appauvries en hydrates ferriques.

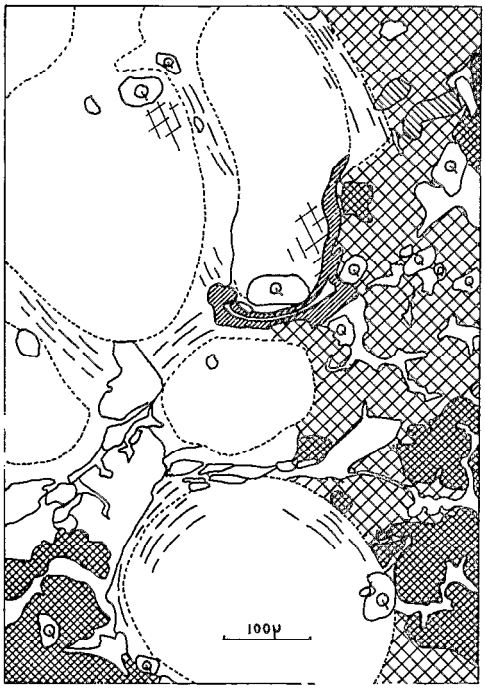
β) La formation des nodules rouge sombre et du fond matriciel clair, pédoturbé.

La transformation de la structure micronodulaire se manifeste à l'échelle millimétrique à centimétrique par le développement de 3 faciès de transformation :

13 ARGILANES ORANGES

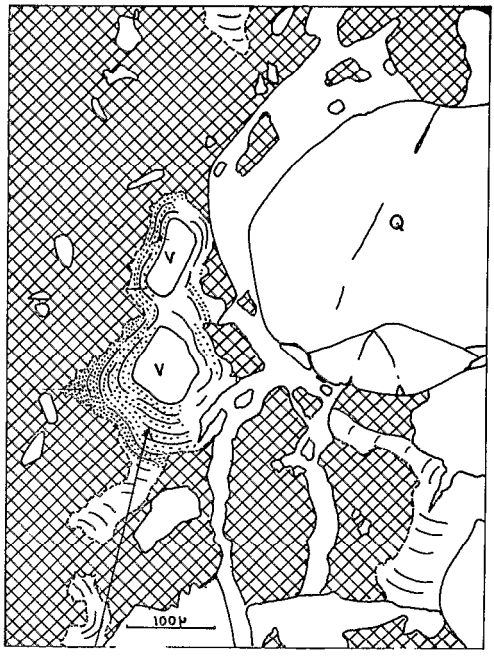
STRIES

Limites sinueuses avec le matériau rouge opacifié



14 FACIES "OSCELLE"

Zonations concentriques de formes ovoïdes.



15 FACIES "A ARGILANES ZONES"

Stries de plus en plus décolorées en direction du vide central.

Pl. 6 - Sol de Transition - Horizons B 21, B 22 et B 3.

- le faciès "oscellé" (pl. 5 , des.14) est caractérisé par la présence de zonations concentriques, décolorées et isotropes en leur centre, jaunes et orientées à la périphérie ; de forme ovoïde à allongée, de 100 à 600 μ de diamètre, elles sont groupées en grappes et prennent place dans la structure micronodulaire de l'horizon B 22 qui tend alors à s'assombrir localement.

- le faciès "à argilanes zonés" (pl. 5 , des.15) est marqué par la différenciation des argilanes qui présentent alors des stries concentriques de plus en plus décolorées en direction des vides dont ils revêtent les parois : rouge sombre et peu distinctes du plasma dense à la périphérie, puis jaune orangé et enfin blanchâtres en bordure des pores.

- le faciès "écaillé" est formé par desquamation du plasma dense en lamelles (de 0,1 à 1 mm d'épaisseur), disposées parallèlement aux bordures des nodules, d'abord séparées par de fines traînées de matériau décoloré, puis noyées dans le fond matriciel beige clair.

Ces faciès représentent une zonation ordonnée qui se traduit par un accroissement de la densité optique et de l'isotropie au sein de secteurs définis, indices d'une restructuration et d'une différenciation qui conduisent à la formation de volumes nodulaires assombris ou même opacifiés (pl. 6 ; des.16 et 17) au sein d'un fond matriciel plus ou moins décoloré.

Ces nodules s'individualisent progressivement de bas en haut dans les horizons profonds :

- largement dominants (80 % du volume) et assemblés les uns aux autres, ils tendent à former une phase continue (en carapace) dans l'horizon B 3,

- moins abondants (50 % du volume), ils sont aussi mieux individualisés dans l'horizon B 22,

- limités à de petits volumes sphériques (20 % du volume), ils sont nettement et totalement délimités dans l'horizon B 21.

Cette individualisation est encore accentuée par les modifications du fond matriciel voisin :

- une décoloration progressive s'y manifeste, croissante de haut en bas (d'autant plus forte que le fond matriciel occupe un volume plus

limité) en relation avec la dispersion des micronodules rouges.

- une fauna-pédoturbation intense y est mise en évidence, non seulement par l'extension des agrotubules, mais encore par la dissémination régulière des micronodules et surtout par l'abondance des vides grossiers, fortement lobés (comme ceux observés dans les agro-tubules) (pl. 6 , des. 16). Cette action de la faune s'arrête aux limites des nodules, marquées par une concentration des bio-vides, découpées comme à l'emporte-pièce, en discordance sur les structures incluses (en particulier les ferri-argilanes striés), dessinant les pourtours de formes contournées qui laissent en saillie les secteurs les plus denses (formant des presqu'îles et des îles) et creusent ailleurs des golfes et des invaginations. Ainsi sont circonscrits dans le sol et individualisés les secteurs dont la cohésion est suffisante pour leur permettre de résister à l'action de la faune.
Cette évolution accentue les contrastes et crée des surfaces de discontinuité entre les nodules et la matrice.

Ces dernières sont elles-mêmes le siège de nouvelles transformations postérieures :

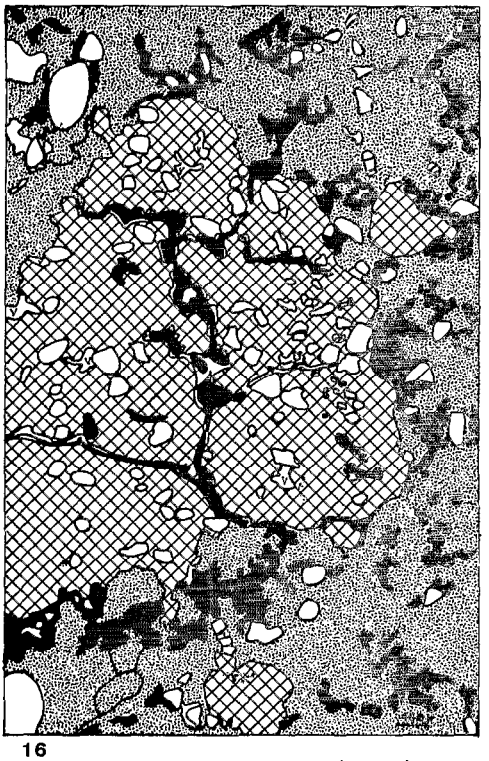
- Les comportements mécaniques différents des nodules et du fond matriciel (en particulier leurs aptitudes différentes au gonflement et au retrait) provoquent la formation de fissures périphériques.

- La redistribution localisée des constituants du plasma (ferri-argilanes) dans ces fissures assure alors la rectification des limites des nodules (pl. 6 , des. 18).

- Le pourtour des nodules se transforme ensuite, de façons différentes selon la disposition et l'importance relative des volumes en présence :

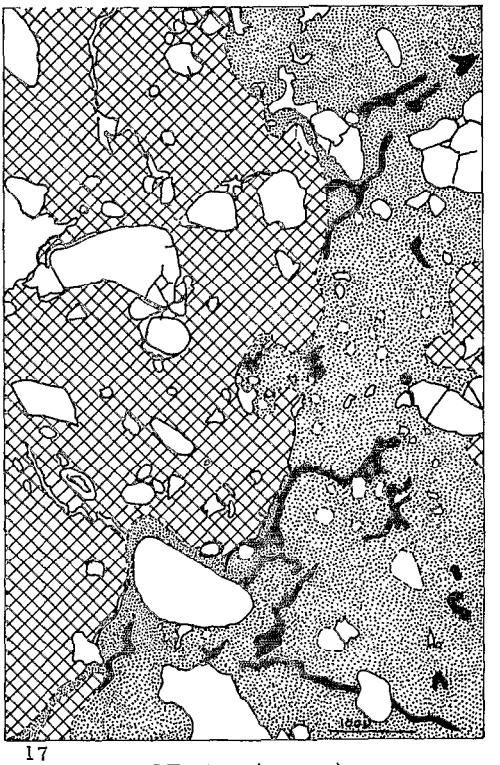
  . décoloration périphérique dans les horizons B 3 et B 22 (dans lesquels 80 à 50 % du volume sont occupés par la structure nodulaire).

  . assombrissement (pl. 6 , des. 18) responsable de la formation d'un cortex dans l'horizon B 21 (et localement B 22) là où les nodules constituent de petites enclaves enveloppées de ferri-argilanes.



16

VUE D'ENSEMBLE (G = 1)

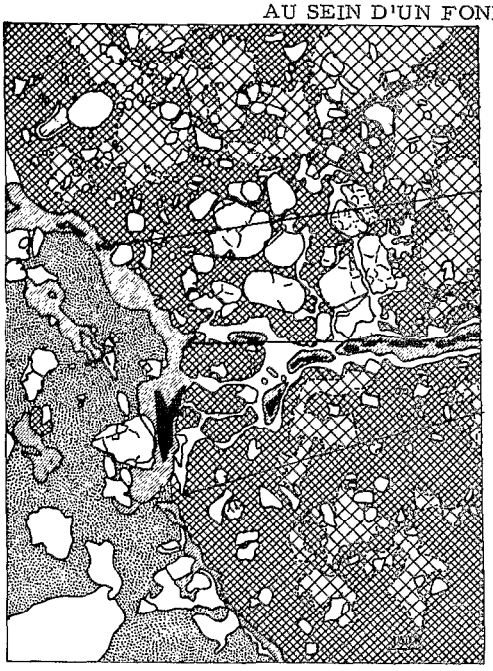


17

DETAIL (G = 10)

VOLUMES NODULAIRES ASSOMBRIS OU OPACIFIES

AU SEIN D'UN FOND MATRICIEL PLUS OU MOINS DECOLORE.



18

TRANSFORMATION DES NODULES.

Fissures périphériques

partiellement occupées

par des ferri-argilanes

Rectification des limites

Tendance à la formation

d'un cortex.

Pl. 7 - Sol de transition - Horizons B 21, B 22 et B 3.

- Des retouches de la forme et de l'organisation des nodules interviennent enfin partout où ceux-ci présentent des points faibles (fissures, lacunes. .) à partir desquels se forment des invaginations qui recoupent les structures incluses (pl. 7 , des. 19). On y observe les traces d'une série de creusement et de dépôts successifs discordants (probablement faits par la faune), ainsi que les indices d'une ségrégation du fer et de l'argile manifestée par la présence de ferri-argilanes zonés au contact desquels les quartz grossiers se chargent d'incrustations d'oxyde de fer tandis que le plasma encaissant s'assombrit. Certaines de ces invaginations sont par la suite occluses et réincorporées au nodule.

c) Conclusions : les transformations des horizons inférieurs du sol de transition.

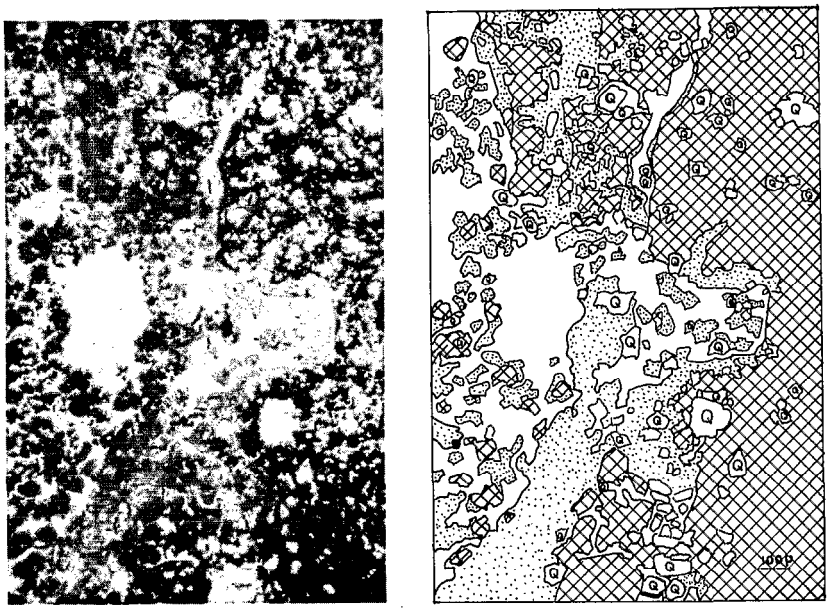
On assiste ici à la transformation de la structure micronodulaire continue de 1er ordre, qui caractérisait les mêmes horizons du sol rouge, en une structure nodulaire de 2nd ordre, plus ou moins discontinue et inégalement distribuée dans un fond matriciel décoloré.

L'ensemble constitué par les micronodules et les argilanes se différencie donc en deux matériaux :

- celui des nodules est chargé en fer, opacifié, cohérent ; il résulterait des processus physico-chimiques qui modifient la concentration et l'état d'association de la kaolinite et des oxy-hydrates de fer.

- celui du fond matriciel est relativement appauvri en fer, décoloré et moins cohérent ; il est brassé en permanence par l'action de la faune qui s'y trouve préférentiellement localisée.

Ces transformations qui donnent naissance à deux matériaux dont les *comportements sont différents sont ainsi* à l'origine des surfaces de discontinuités établies par la faune, délimitant les nodules du fond matriciel. Celles-ci sont à leur tour le siège de réorganisations et de nouvelles ségrégations des constituants du plasma qui ont pour effet de décolorer la périphérie des volumes nodulaires dans les horizons B 3 et B 22 mais aussi de former un cortex autour des petits nodules enclavés dans l'horizon B 21 (qui tendent ainsi à s'enkyster).



19 INVAGINATIONS RECOUPANT LES STRUCTURES

DES NODULES (G = 1)

20

DETAIL D'UNE INVAGINATION

Série de creusement et de dépôts successifs discordants

Indices d'une ségrégation du fer et de l'argile manifestée par

La présence de ferri-argilanes zonés, au contact desquels les quartz grossiers se chargent d'incrustations d'oxyde de fer.

Pl. 8 - Sol de transition - Horizons.

2/ - Analyse microscopique des horizons B 1, AB et A, constituant l'apexsol.

Compris entre 0,8 mètre de profondeur et la surface, ces horizons sont nettement différenciés, tant par la couleur (jaune rouge, rouge jaune et brun gris rouge) que par la texture (argileuse, sablo-argileuse et sableuse) et la structure (polyédrique grossière puis nuciforme peu nette).

a) Les constituants.

α) Le squelette.

Son abondance augmente nettement dès la base de l'horizon B 1, (il y occupe près de 1/3 du volume total), puis de façon beaucoup plus forte dans les horizons AB et A pour atteindre près de 50 % du volume en surface.

L'état et la distribution dimensionnelle des quartz sont également modifiés de bas en haut. Ainsi les grains grossiers et moyens, arrondis, fortement fissurés et corrodés (comparables à ceux contenus dans les nodules de l'horizon B 21 mais débarrassés de leur gangue ferrique et de leurs incrustations) ne sont représentés qu'à la base de l'horizon B 1. Plus haut ces grains se morcellent en fragments subanguleux, moyens et fins, dont la proportion atteint sa valeur maximale dans l'horizon AB. L'horizon A est lui-même caractérisé par l'abondance de grains grossiers formant un assemblage granulaire, et de grains très fins concentrés autour des vides biologiques.

β) Le plasma.

Son abondance s'accroît légèrement de bas en haut à la base de l'apexsol (maximum relatif en B 1 proche de 50 % du volume) à l'inverse de ce qui a été observé dans le sol rouge ; elle diminue ensuite progressivement de bas en haut et devient faible à proximité de la surface (10 % du volume). Ce plasma est clair, à faible densité optique ; il inclut des micronodules rouges et s'enrichit progressivement en très petits grains de quartz d'une dizaine de microns de diamètre qui lui donnent un aspect grenu, ainsi qu'en très fines ponctuations brunes de matière organique. La distribution de ces inclusions est hétérogène, en relation avec celle de la porosité. Dans l'horizon humifère, ce plasma est, pour sa plus grande part, concentré autour des vides biologiques.

b) Les modifications des constituants.

α) La distribution de deux sortes différentes de micronodules.

Beaucoup moins abondants (dans leur ensemble) que dans les horizons équivalents du sol rouge, les micronodules sont représentés :

- par des formes résiduelles noyées dans le fond matriciel, localement estompées, teintées de rouille dans les secteurs compacts décolorés, plus rouges et mieux individualisées à proximité des vides se raréfiant de bas en haut (pratiquement absentes de l'horizon AB),

- par des globules ovoïdes ou sphériques, très petits ($\varnothing$ 10 à 30 μ) concentrés à l'intérieur et sur le pourtour des cavités biologiques ; leurs limites, nettes, deviennent diffuses et marquées par un liseré blanc lorsqu'ils sont enveloppés de plasma, passant à l'extrême à des halos globulaires. Bien que comparables à ceux des horizons profonds, tant par leur couleur que par la nature de leurs constituants, ces micronodules, accumulés à proximité de la surface, présentent des organisations et des distributions particulières acquises lors de leur transport et de leur dissémination par la faune du sol.

β) Les argilanes.

Ils n'occupent que des secteurs très limités, autour des fentes de retrait dans l'horizon B 1 : jaunes, à striations brunes, ils y sont directement associés à des grains de squelette qu'ils revêtent de toutes parts.

Ils caractérisent également dans l'horizon AB le niveau où les quartz deviennent jointifs : fins (de 10 à 50 μ), jaunes, peu limpides, faiblement orientés, à limites nettes, ils constituent localement de petites nappes subhorizontales discontinues et tapissent les parois de tous les pores situés au dessus de ce niveau .

Quelques très fins argilanes du même type sont également visibles à la base de l'horizon A.

γ) Les nodules.

Il en existe seulement quelques-uns, à la base de l'horizon B 1, caractérisés par des grains de quartz formant saillies, des écailles de desquamation de matériau nodulaire séparées par de fins argilanes jaune clair, des invaginations largement ouvertes, sans organisation interne, pénétrant profondément les nodules qu'ils tendent à recouper et à diviser en fragments.

c) La pédoturbation superficielle.

Là encore, deux mécanismes interviennent.

- Le premier résulte des tensions engendrées par le gonflement et le retrait lors des alternances d'humectation et de dessiccation (argilli-pédoturbation). Il se manifeste surtout par des orientations du plasma limitées à des flots ou à des taches (plasma insépique).

- Le second lié à l'activité de la faune est responsable de la formation des agrotubules.

Ces derniers occupent près de 15 % du volume dans l'horizon B 1 ; assez nettement délimités, moyennement contrastés, ils sont plus colorés que le fond matriciel ; constitués par un empilement lâche de micro-agrégats finement découpés ($\varnothing$ de 100 à 500 µ) et de grains de quartz, formant une masse granulée, poreuse, sans arrangement directionnel particulier. La part du volume total qu'y occupe le squelette est du même ordre de grandeur que dans la matrice, celle des vides y est beaucoup plus importante et celle du plasma moindre. Ce dernier inclut de nombreux micronodules qui contribuent à donner à l'ensemble sa coloration plus vive. Autour d'eux, des "néomatranes" résultent des pressions exercées lors de la formation des chenaux.

Dans l'horizon A, les accumulations de micronodules et de plasma à l'intérieur et sur le pourtour des vides biologiques sont la conséquence des transports effectués par la faune. La pédoturbation provoque ainsi dans les horizons superficiels du sol de transition, une modification très poussée de l'assemblage et de la distribution des constituants.

d) Conclusion : les transformations des horizons supérieurs du sol de transition.

Ces horizons contiennent encore des micronodules qui confèrent au sol sa coloration rouge. Cependant ces derniers sont toujours noyés dans le plasma et n'interviennent directement ni sur le mode d'assemblage, ni sur la porosité qui sont ici déterminés essentiellement par les proportions de plasma et de squelette et par l'activité de la faune qui maintient dans l'horizon le plus argileux (et le plus fortement soumis aux phénomènes de gonflement et de retrait) une porosité grossière limitée au faible volume

des agrotubules.

La redistribution des constituants est manifestée par la présence de quelques argilanes jaunes, limités à la proximité des fentes dans l'horizon B 1 et à l'horizon AB, et par les résultats de l'activité de la faune (remontée et concentration des micronodules et du plasma à partir des vides biologiques).

3/ - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol de transition.

a) Relations avec les autres données analytiques et le comportement du sol en place.

α) Les variations verticales de l'abondance du plasma et des taux d'argile et de fer total.

La concordance entre ces données est ici beaucoup moins bonne qu'elle ne l'était dans le sol rouge. Les taux d'argile (ϕ 2 µ) obtenus par la méthode classique d'analyse granulométrique (cf. chap. 6) ne sont ici en relation approximative qu'avec l'abondance du plasma situé hors des nodules bien différenciés. Les liaisons interparticulaires de ces derniers, à la différence de celles des micronodules dont ils dérivent, sont donc réfractaires à l'action du réactif dispersant utilisé (hexamétaphosphate).
La présence d'argilanes jaunes à striations brunes dans l'horizon AB correspond à un léger décrochement dans la variation verticale du taux d'argile.

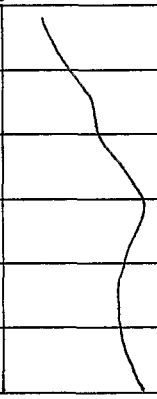
L'ensemble des relations constatées est exprimé dans le tableau 9-1.

L'appréciation tactile de la texture révèle bien la complexité des organisations et reconnaît l'existence de deux phases distinctes : nodulaires (à texture plus ou moins masquée par la cimentation) et internodulaire (argilo-sableuse).

Les variations verticales des teneurs en fer total comparées à celles de l'argile granulométrique (cf. chap. 7) mettent nettement en évidence une ségrégation des hydrates ferriques et de la kaolinite, en accord avec les données micromorphologiques : les valeurs maximales des premières correspondent en effet souvent aux valeurs minimales des secondes. Il y a lieu cependant d'ajouter une réserve à cette première

Tableau 9-1.

RELATIONS ENTRE LES VARIATIONS VERTICALES DU TAUX D'ARGILE GRANULOMETRIQUE ET LES DONNEES MICROMORPHOLOGIQUES.

HORIZON	VARIATIONS VERTICALES DES TAUX D'ARGILE ($\varnothing < 2\ \mu$) 0 A%	MICROMORPHOLOGIE		
		ARGILANES	NODULES	
			Abondance	Différenciation
A			0	
AB		+ +	0	
B 1			0	
B 21			10 à 35 %	+ + +
B 22		+	35 à 60 %	+ +
B 3		+	60 à 80 %	+

interprétation, puisque la concentration d'hydrates ferriques dans les nodules entraîne l'immobilisation d'une partie de la kaolinite, et donc la sous-estimation du taux d'argile granulométrique.

On remarque de plus que la teneur en fer total est relativement diminuée, non seulement dans l'apexsol, mais encore dans l'horizon B 21 où s'enkystent les nodules (ces derniers apparaissent ainsi comme des concentrations résiduelles), tandis qu'elle est fortement accrue dans l'horizon B 3, à structure nodulaire dominante qui serait ainsi le siège d'une accumulation d'hydrates ferriques (dans laquelle s'amorce cependant la décoloration périphérique des nodules).

β) L'évolution du squelette et la granulométrie des sables.

Les variations de la granulométrie sont ici fortement influencées par la présence de fragments de nodules mélangés aux grains de quartz, aussi ne s'accordent-elles pas avec les observations faites sur le squelette quartzeux.

γ) Les variations de l'organisation et les mesures de porosité.

Ces dernières révèlent surtout une forte diminution de porosité totale, de bas en haut, dans l'horizon B 1 (vers 50 cm) là où le squelette occupe un volume croissant, mais forme toujours un assemblage porphyrosquelique dans un plasma décoloré, la porosité grossière étant limitée à quelques agrotubules.

Les variations "en marches d'escalier", présentant des crochets superposés dans l'horizon AB, correspondent aux transformations de l'assemblage (qui, de porphyrosquelique devient intertextique puis granulaire) et à la présence d'argilanes.

La très forte porosité de l'horizon A est à mettre en relation avec l'assemblage granulaire lâche et avec l'abondance des vides biologiques.

δ) Les données relatives au régime hydrique.

Quelques mesures d'humidité faites dans ce sol révèlent une tendance au développement des engorgements durant la saison des pluies dans la partie supérieure du profil (horizons A, AB et partie supérieure de B 1) en relation avec les limitations en marches d'escalier de la porosité, et une hétérogénéité croissante de l'humectation dans les horizons plus profonds où s'individualisent les nodules.

b) Conclusions sur l'organisation du sol de transition.

Les sols de transition, observés au microscope, sont ainsi caractérisés :

- par l'apparition de mécanismes de dissociation des constituants et l'établissement de nouvelles liaisons interparticulaires,
  - . renforcées dans les volumes nodulaires plus cohérents (cimentés)
  - . affaiblies dans le fond matriciel éclairci où s'exerce alors préférentiellement l'activité biologique.

- par les transformations ultérieures résultant des interactions entre les deux phases ainsi formées qui s'interpénètrent mais sont séparées par des surfaces de discontinuité ; elle tend à enkyster les petits volumes enclavés (horizons B 21 et B 22) et à décolorer les masses nodulaires continues (horizons B 3 et B 22).

- par l'évolution de l'apexsol, dépendante de la distribution des constituants simples (plasma et squelette) et de l'activité biologique, mais non plus de la présence des micronodules réduits à de petites inclusions noyées dans le plasma et à des "remontées" accumulées par la faune dans l'horizon A.

C - L'ORGANISATION MICROSCOPIQUE DES SOLS ROUGES CULTIVES.

Elle a été observée sur une trentaine de lames minces réalisées à partir d'échantillons prélevés dans la séquence d'évolution des sols sous culture (dont l'ancienneté du défrichement s'échelonne de 0 à 90 ans).

L'analyse microscopique de ceux d'entre ces sols dont la couleur a été modifiée par la mise en culture (voir chap. 5) met surtout en évidence leur très grande similitude avec le sol de transition (déjà observée sur le terrain et remarquée par SEGUY, 1969 mais reconnue ici à l'échelle de l'organisation microscopique).

Dans les horizons profonds, la structure micronodulaire présente les mêmes faciès de transformation et donne naissance à une structure nodulaire de 2me ordre identique, plus ou moins discontinue, au sein d'un fond matriciel partiellement décoloré.

Dans les horizons plus superficiels, les micronodules tendent là aussi à disparaître du fond matriciel constitué essentiellement de plasma clair et de quartz. Les argilanes jaune rouge à orientations et limites diffuses sont toutefois plus représentés dans les horizons AB et B 1 qu'ils ne le sont dans le sol de transition sous forêt ; leur présence est l'indice d'une réorganisation (et d'une redistribution) actuelle et intense du plasma. L'organisation de l'horizon A, constitué principalement de grains de quartz et de quelques "remontées" de plasma (par la faune et par le travail du sol) est très dépendante des façons culturales et de l'érosion.

La similitude des transformations observées, soit ici dans le temps en fonction des perturbations occasionnées par la mise en culture, soit dans l'espace, de façon ordonnée, sous végétation forestière naturelle, permet de conclure :

- que les mécanismes mis en cause sont analogues ou du

moins comparables dans les deux cas,

- que ces transformations sont liées à des variations de pédo-climat (que celles-ci soient provoquées ou non par une action extérieure),

- que le temps requis pour leur intervention est relativement bref (en regard de l'âge de ces sols),

- que les modifications provoquées s'arrêtent au stade correspondant au sol de transition (dans les limites de temps considérées).

D - L'ORGANISATION MICROSCOPIQUE DU SOL BEIGE.

1/ - L'analyse microscopique des horizons profonds : B 3, B 22 et B 21 formant l'infrasol.

Observée sur le terrain, cette partie du profil présente les caractéristiques suivantes : horizons clairs, bariolé (B 3), brun rouge pâle (B 22) à brun très pâle (B 21) ; à nodules, peu indurés, irrégulièrement délimités et envahis par des taches bariolées (horizons B 3 et B 22), ou durcis, nettement individualisés et entourés par un cortex (surtout dans l'horizon B 21) ; parcouru par un réseau dense d'agrotubules, contenant un matériau hétérogène à structure grenue.

a) Les constituants.

α) Le squelette.

Mieux représenté que dans les horizons équivalents du sol rouge et du sol de transition, il est constitué de grains moyens et fins (Ø 50 à 200 µ), très fragmentés, irrégulièrement incrustés d'oxyde de fer.

Son abondance s'accroît sensiblement dans l'horizon B 22, tandis qu'augmente la proportion de grains grossiers, inclus dans les nodules, incrustés d'oxyde de fer au contact du plasma dense, caverneux et fragmentés dans les secteurs décolorés.

Occupant un volume comparable à celui du plasma dans l'horizon B 21 (35 % du total), il y est formé de grains : plus grossiers, arrondis et incrustés dans les nodules à cortex, plus fins et anguleux dans le maté-

riau clair qui les englobe.

A des caractères de différenciation analogues à ceux observés dans le sol de transition, s'ajoutent ici des modifications liées à la décoloration du fond matriciel (dissolution des incrustations et fragmentations).

(?) Le plasma.

Il présente des variations quantitatives : encore abondant dans la masse nodulaire de l'horizon B 3 (45 % du volume), il occupe un volume moindre dans l'horizon B 22 (30 à 35 % du volume) et augmente faiblement dans l'horizon B 21 (35 % du volume).

Il est aussi caractérisé par des transformations importantes :

- la poursuite de la réorganisation, amorcée dans le sol de transition, y est manifestée par le développement des domaines anisotropes,

- la décoloration s'y étend à une fraction croissante du matériau,

- des vides y apparaissent comme des lacunes dans l'assemblage plasmique, tandis que le quartz inclus se modifient ou se fragmentent dans les secteurs transformés.

b) La transformation des nodules et l'individualisation de reliques micronodulaires et concrétionnées.

La structure nodulaire de 2me ordre, formée dans le sol de transition à partir de la structure micronodulaire du sol rouge, se transforme à son tour, dans le sol beige, de trois manières différentes :

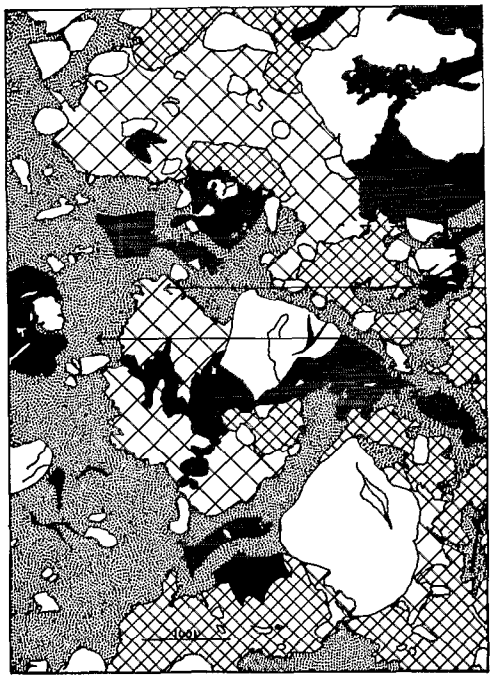
- A la base du profil, dans l'horizon B 3, la phase nodulaire incomplétement individualisée est envahie (à partir de sa périphérie et par les golfes qui la pénètrent) par des taches blanc jaune, à nuances verdâtres, à orientations plasmiques d'aspect pailleté (pl. 8 , des. 21).

Celles-ci, reliées à l'extérieur du nodule :

- isolent de petits volumes sphériques, rouges, isotropes plus ou moins opaques qui constituent des micronodules reliques et subsistent seuls après la "digestion" des nodules rouge sombre,

- acquièrent par fauna-pédoturbation les caractères du fond matriciel internodulaire.

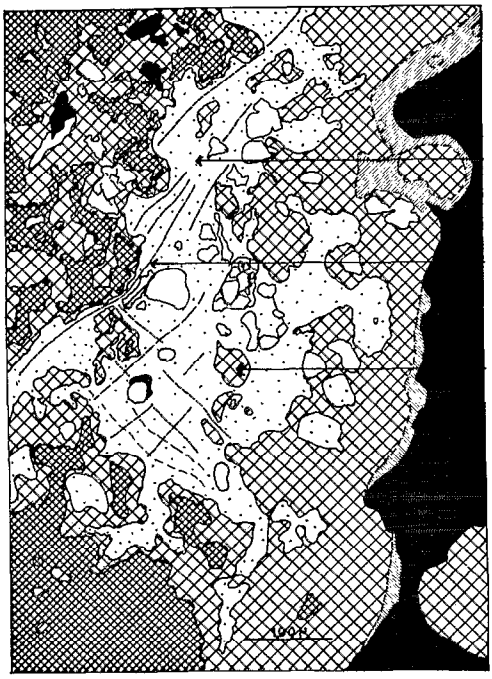
Cette évolution entraîne la disparition partielle de la structure nodulaire.



22

HORIZON B 22

Les nodules rouge clair
sont progressivement
estompés, passant par
des taches diffuses
à un fond matriciel décoloré.



21

HORIZON B 3 (G = 3, 5)

La phase nodulaire est envahie
par des taches blanc jaune
à nuances verdâtres
à orientations plasmiques
d'aspect pailleté

Les micronodules "reliques"
subsistent seuls
après la digestion
des nodules rouge sombre.

Pl. 8 - Sol beige - Horizons B 21 - B 22 et B 3.

- Dans l'horizon B 22, les nodules rouge clair, compactes, à orientations striées, sont progressivement estompés à partir de leur périphérie, passant par des taches diffuses à un fond matriciel décoloré (pl. 8 , des. 22). Il se produit donc une disparition totale des nodules qui sont assimilés au fond matriciel.

- Dans l'horizon B 21 (et une partie de l'horizon B 22), les nodules déjà individualisés et "enkystés" sont opacifiés et donnent des nodules complexes reliques, correspondant aux "concrétions".

La présence d'argilanes jaunes, peu abondants, à limites plus ou moins diffuses, qui bordent soit les nodules rouges incomplètement individualisés et les taches décolorées qui les envahissent, soit les vides (ou lacunes) situées dans ces dernières et englobent de très petits grains de quartz et des micronodules reliques, alors transformés en halos globulaire, semble être l'indice d'un départ de plasma à partir des lacunes surtout représentées dans l'horizon B 22.

Cette transformation des nodules a pour effet d'augmenter l'importance relative du fond matriciel, alors caractérisé par :

- des indices de fauna-pédoturbation (vides fortement lobés analogues à ceux des agrotubules),

- des orientations désordonnées, probablement dues à son comportement mécanique propre (argilli-pédoturbation),

- un aspect localement tacheté (décoloré ou assombri) résultant :

  . soit de l'intégration de micronodules reliques (halos globulaires)

  . soit de nouvelles ségrégations (nodulation diffuse).

c) Conclusions : les transformations des horizons profonds du sol beige.

Il apparaît à l'observation microscopique que :

- ces horizons profonds deviennent clairs et plus ou moins bariolés par disparition partielle des structures nodulaires rouges qui dominaient dans le sol de transition,

- cette disparition plus ou moins complète des nodules résulte de la poursuite de l'action des mécanismes de dissociation des constituants, amorcée dans le sol de transition.

- cette évolution pourrait être liée au contraste manifesté au niveau des discontinuités qui séparent les volumes nodulaires du fond matriciel, et peut être plus particulièrement, au contact de deux systèmes de porosité très différents, à des modifications localisées du fonctionnement hydrique, responsables du développement de l'hydromorphie.

Ainsi les horizons profonds du sol beige sont principalement caractérisés :

- par la présence de reliques nodulaires (B 21) et micronodulaires (en quantités décroissantes de bas en haut),

- par la dominance d'un fond matriciel pédoturbé ou apparaissent de nouvelles ségrégations des constituants du plasma (nodulation diffuse).

La succession de ces dissociations et de ces redistributions des constituants, observée depuis le sol rouge, nous apparaît remarquable.

2/ - L'analyse microscopique des horizons supérieurs B 1, AB et A, constituant l'apexsol.

Ces horizons, compris entre 1,10 mètres et la surface, sont nettement différenciés, de couleur brun très pâle, brun clair à brun à taches diffuses ocre rouille et grisâtre (B 1), brun (AB), à brun sombre (A), à texture argileuse (B 1) à sableuse (A), à texture polyédrique très grossière (B 1) à nuciforme grossière peu nette associée à une structure grumeleuse localisée (A).

a) Les constituants.

α) Le squelette.

Son abondance s'accroît faiblement (de 35 à 40 % du volume total) de bas en haut mais diminue en valeur relative par rapport au plasma) à la base de l'horizon B 1, puis augmente très nettement (de 40 à 50 % du volume total) au sommet de cet horizon, et enfin diminue légèrement (45 % du volume total) dans les horizons AB et A à mesure que se développe la porosité grossière.

L'état et la distribution dimensionnelle des grains de quartz qui le constituent présentent également des variations importantes : à la base de

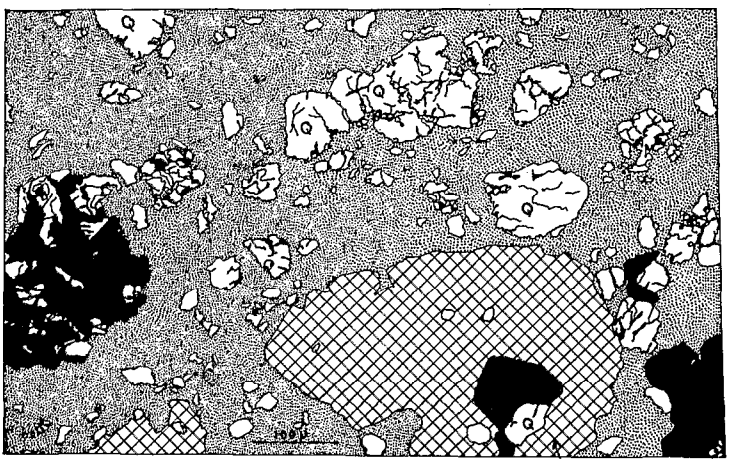
l'horizon B 1, les quartz grossiers ($\phi > 200\ \mu$), arrondis, corrodés, caverneux et fracturés à l'extrême (pl. 9 , des.23), comparables à ceux contenus dans les nodules de l'horizon B 21 mais dépourvus d'incrustations, sont largement représentés. Leur morcellement est observé de bas en haut, (des.24) donnant naissance à des grains fins (20 à 200 μ), encore plus ou moins groupés et imbriqués ou dispersés dans le fond matriciel, dont la proportion, maximale au sommet de l'horizon B 1 (coïncidant avec la plus forte abondance absolue du squelette), se maintient dans l'horizon AB et diminue faiblement dans l'horizon A.

β) Le plasma. Son abondance augmente faiblement à la base de l'horizon B 1 (35 % du volume), puis très nettement pour atteindre une valeur maximale au milieu de cet horizon (40 % du volume) avant de diminuer fortement dans sa partie supérieure, les variations restant faibles au niveau des horizons AB et A. Ce plasma est brun très pâle dans l'horizon B 1, hétérogène, il englobe des reliques de micronodules rouges, de très fins granules rouges ($\phi < 10\ \mu$) issus de leur désagrégation et de très petits grains de quartz ; s'y ajoutent, en quantité croissante de bas en haut, des ponctuations et des particules brunes à opaques, irrégulièrement réparties en relations avec les vides d'origine biologique, de nature organique.

b) Les modifications des constituants.

Les micronodules (ϕ 10 à 500 μ) sont peu abondants (< 10 % du volume). De couleur rouge sombre, isotropes, parfois entourés d'un léger liseré clair, ils correspondent aux reliques micronodulaires observées dans les horizons plus profonds. Irrégulièrement disséminés dans le fond matriciel, ils sont localement groupés dans des agrotubules et se présentent ailleurs comme des grains de squelette, certains d'entre eux étant d'ailleurs associés à des quartz fracturés. Ils se désagrégent en très fins granules rouges à la base de l'horizon B 1 et se transforment localement, dans les secteurs les plus compacts en halos globulaires rouge jaune. On en trouve jusque dans l'horizon A, de dimensions et de formes diverses, concentrés autour des vides d'origine biologique, individualisés ou transformés en halos glébulaires.

Les argilanes sont aussi peu représentés, de couleur jaune orangé, faiblement orientés, à limites nettes, ils couvrent les parois des

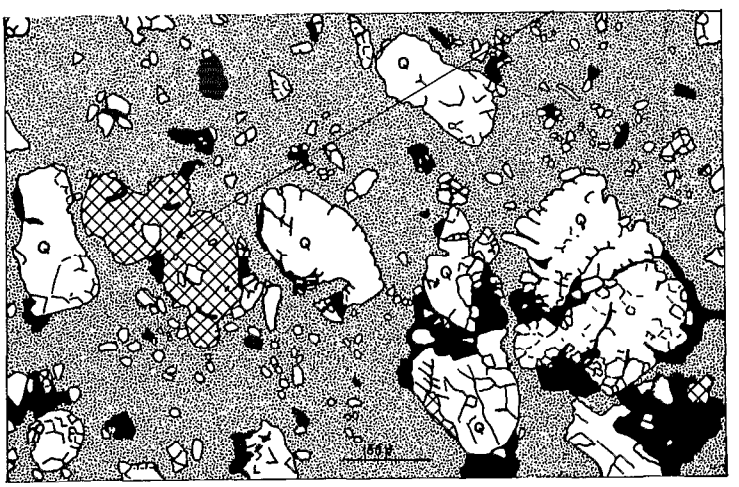


24 SOMMET DE L'HORIZON B 1

Quartz plus ou moins groupés

et imbriqués ou dispersés

dans un fond matriciel décoloré + Reliques de micronodules.



23 BASE DE L'HORIZON B 1

Quartz grossiers arrondis, corrodés, caverneux

et fracturés à l'extrême.

Plasma brun très pâle, hétérogène, englobant

des reliques de micronodules rouges.

Pl. 9 - Sol beige - Horizons AB et B 1.

chenaux et des petites cavités présentes au sommet de l'horizon B 1 et dans l'horizon AB.

Les nodules sont pratiquement absents.

Les agrotubules sont surtout développés dans la partie supérieure de l'horizon B 1. La distribution irrégulière du squelette et du plasma à leur périphérie résulte des pressions exercées par la faune et par les racines lors de la formation des chenaux auxquels ils correspondent. Elle se manifeste par la différenciation de secteurs plus denses (ou néomatranes)

Des taches diffuses, ocre rouille et grisâtres, apparaissent en relation avec la distribution des constituants et des vides : les premières dans les secteurs poreux, les secondes liées à une forte compacité du fond matriciel.

c) Conclusion : les transformations dans les horizons supérieurs du sol beige.

On observe à ce niveau la dissociation presque complète des constituants et leur redistribution au sein des horizons pédologiques dont la différenciation s'accroît :

- assemblage granulaire lâche de grains de quartz et concentration du plasma autour des vides biologiques (horizons A et AB),
- assemblage porphyrosquelique à grains dispersés dans du plasma clair (horizon B 1).

Cette différenciation se réalise :

- par les actions mécaniques propres au matériau argileux (horizon B 1),
- par les actions biologiques, particulièrement intenses à proximité de la surface (A et AB et sommet de B 1),
- par la pénétration des constituants organiques qui contribuent à donner à chaque horizon sa coloration particulière.

3 / - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol beige.

a) Relations avec les autres données analytiques.

α) Les variations du plasma et les taux d'argile et de fer total.

Les variations verticales des taux d'argile ($\phi < 2\ \mu$) obtenus par la méthode classique d'analyse granulométrique correspondent ici approximativement, à la fois à celles de l'abondance du plasma situé hors des nodules enkystés et à celle des quantités d'argile appréciées sur le terrain.

Les variations verticales des teneurs en fer total (cf. fig. 7-1. p. 155) sont ici relativement indépendantes de celles de l'argile granulométrique et de l'abondance du plasma ; elles sont surtout à mettre en relation avec les concentrations observées au microscope. Un premier maximum au sommet de l'horizon B 1 correspondrait aux argilanes jaune orangé décrits à ce niveau, qui proviendraient, eux-mêmes, de la dissociation des micronodules rouges remontés par la faune. Les deux valeurs maximales décelées dans les horizons B 21 et B 22 sont à mettre en relation avec la présence de concrétions dans un fond matriciel décoloré. Des teneurs faibles dans l'horizon B 3 s'accordent avec les indices de déferrification observés à ce niveau.

β) L'évolution du squelette et la granulométrie des sables.

Les variations verticales de la granulométrie des sables sont en partie influencées par la présence de fragments de nodules dans ces fractions extraites des horizons B 22 et B 21 ; au-dessus, une augmentation forte et progressive de la proportion de sables fins (quartzeux), depuis la base de l'horizon B 1 jusqu'à son sommet, exprime la fragmentation des grains de quartz corrodés, observée à ce niveau.

γ) Les variations de l'organisation et les mesures de porosité.

Les variations verticales de la porosité totale sont fluctuantes et irrégulières dans les horizons bariolés (caractérisés cependant par le maintien d'une porosité relativement élevée) ; elles font apparaître une nette diminution dans l'horizon B 1 qui traduit la compacité croissante de l'assemblage porphyrosquelique (progressivement enrichi en quartz de bas en haut) partiellement compensée par le développement d'agrotubules ;

une porosité élevée dans les horizons AB et A (reconnue au microscope comme étant grossière, intergranulaire et d'origine biologique) marque cependant un minimum dans l'horizon AB, qui pourrait résulter des effets conjugués du tassement des sables et du dépôt de petits argilanes.

c) Les données relatives au régime hydrique.

Les mesures d'humidité révèlent la pénétration rapide et hétérogène de l'eau jusqu'à l'horizon B 21, puis sa diffusion progressive à partir des secteurs engorgés, et enfin le ralentissement très lent du drainage vertical, au niveau de l'horizon B 1, au cours de la saison des pluies.

Ce fonctionnement hydrique particulier doit être mis en relation :

- avec la présence de fentes (et de quelques agrotubules) au sein de l'horizon B 1, constituant des voies de pénétration préférentielle pour l'eau,

- avec l'aspect taché ou bariolé des horizons profonds (B 1, B 2 et B 3) indice d'une humectation hétérogène,

- avec les manifestations de gonflement et de retrait responsables de la fermeture des fentes après humectation totale, et donc du ralentissement du drainage au niveau de l'horizon B 1.

b) Les principales transformations et l'organisation du sol beige.

A la lumière des observations faites sur les autres profils de la toposéquence, l'analyse microscopique distingue dans le sol beige deux ensembles d'organisations pédologiques :

- Les premières correspondent à des "reliques" de celles qui ont été précédemment étudiées. Elles sont affectées par une "ultime" dissociation qui :

  . réduit à l'état de micronodules résiduels et de fond matriciel, plus ou moins taché, décoloré et pédoturbé, les volumes nodulaires incomplètement individualisés,

  . transforme en structuresconcrétionnées, les petits nodules sphériques déjà "enkystés".

- Les secondes sont révélatrices d'une nouvelle évolution au sein de la masse de plus en plus continue du fond matriciel, formée par le regroupement et l'homogénéisation des constituants non inclus dans les

concrétions :

. ségrégations actuelles du fer et de la kaolinite sous forme de taches diffuses en relation avec la distribution de la macroporosité,

. redistribution des constituants au sein des horizons.

Ainsi se développe une nouvelle différenciation du profil pédologique, surtout dépendante des processus d'éluviation et d'hydromorphie secondaire.

E - CONCLUSIONS : LES RELATIONS ENTRE LES SOLS ROUGES ET LES SOLS BEIGES.

L'observation microscopique des échantillons prélevés dans la toposéquence a confirmé l'absence de changement dans la nature des constituants, mais elle a surtout mis en évidence des variations complexes dans l'organisation des matériaux pédologiques, qui ont été analysés à l'échelle des assemblages élémentaires.

Afin d'effectuer la synthèse de ces données, nous examinerons successivement :

- les principales organisations, leurs distributions et leurs relations,
- les transformations de ces organisations,

avant de conclure sur l'apport des analyses microscopiques.

1/ - Les principales organisations, leurs distributions et leurs relations.

a) Les trois principales catégories d'organisations

Nous distinguerons ici :

1) celles qui concernent la formation, l'évolution et la disparition des structures nodulaires.

Elles se manifestent :

- par des concentrations plasmiques (de plasma rouge vif, rouge sombre à opaque) dans les "formes" nodulaires,

- par des modifications de l'assemblage (qui tend à devenir isotrope dans les "formes" nodulaires),

- par des variations localisées et progressives de la concentration et de l'anisotropie (zonations et séparations plasmiques en bordure des "formes" nodulaires).

Elles correspondent :

- à de nouveaux assemblages des constituants (ainsi les micronodules isotropes prennent naissance dans le fond matriciel anisotrope de l'horizon B 3 de sol rouge),

- et/ou à des ségrégations des constituants du plasma (hydrates ferriques et kaolinite).

Elles sont à l'origine de la disparité entre deux sortes de plasma :

- l'un rouge, rouge sombre à opaque (dans les "formes" nodulaires),

- l'autre beige plus ou moins éclairci.

Chacun de ceux-ci caractérise, en fait, un fond matriciel différent dans lequel il se trouve associé au squelette quartzeux. Or, ce dernier ne joue qu'un rôle d'encombrement (bien qu'il évolue) dans le fond matriciel rouge nodulaire qui constitue sa propre armature, mais intervient sur le comportement du fond matriciel beige en fonction de sa concentration.

2) Celles concernant <u>la formation, l'évolution et la disparition des "formes" cutaniques</u>.

Elles se manifestent :

- par des cutanes (plus précisément des argilanes et ferri-argilanes), qui dans certains cas sont différenciés sur place (par réorientation des particules argileuses (péri-nodulaire ou autour d'un vide) mais dans d'autres cas résultent d'un transport (illuviation) (seule la netteté des limites permet, parfois, de les distinguer).

- par des transformations de ces cutanes où apparaissent et se développent des zonations assombries (le plus souvent à la périphérie) et éclaircies (au centre).Ces dernières, qui masquent parfois les limites et rendent difficiles les distinctions, résultent de phénomènes de ségrégation (du fer et de la kaolinite).

Une autre transformation (particulière aux argilanes rouges) consiste en leur incorporation au plasma isotrope des micronodules.

Elles correspondent à des dissociations, suivies ou non de transport et de réincorporations ;

- celles-ci ont pour effet d'entraîner les pertes ou des recharges des formes nodulaires ou du fond matriciel,

- elles sont très souvent liées à des phénomènes de ségrégation (argilanes zonés) qui, dans le cas général provoquent une concentration du fer (et une opacification) des formes nodulaires et sont suivies d'une exportation de l'argile déferrifiée (décolorée) conformément au schéma proposé par STOOPS (1968).

3) Celles liées à l'activité biologique.

Elles se manifestent :

- par des agrotubules dont les aspects sont très différents selon le matériau dans lequel ils prennent place :

  . à peine contrastés et non liés à des modifications de l'organisation des constituants dans le matériau micronodulaire rouge,

  . contrastés, souvent revêtus d'argilanes, et limités aux secteurs décolorés, là où interviennent les phénomènes de ségrégation,

  . associés à des redistributions périphériques du squelette, du plasma et des vides dans les fonds matriciels dépourvus de structure micronodulaire.

- par des néomatranes qui correspondent à ces redistributions, mais se généralisent alors à tous les vides biologiques (cavités, chenaux...).

Elles correspondent à des transports de particules (simples ou complexes) et à des pressions exercées sur les parois des vides. Ce sont donc principalement des actions mécaniques, qui sont ici secondaires aux deux précédentes organisations.

Remarquons qu'il est difficile d'isoler et de traiter séparément ces 3 organisations qui s'interpénètrent souvent et qui ont entre elles des relations génétiques, de telle sorte qu'il n'est pas toujours possible d'établir leurs

limites respectives.

Il faut également signaler que ces trois organisations ne caractérisent qu'une partie des profils, souvent réduite (ainsi les concrétions sont limitées à de petites inclusions dans l'horizon B 2 des sols beiges) ; leur signification génétique n'en est pas pour cela moins importante.

b) Leurs distributions verticale et latérale.

x) Les distributions des "structures glébulaires".

Les trois principaux profils étudiés sont caractérisés par des distributions différentes des micronodules, nodules et concrétions regroupés ici sous l'appellation plus générale de glébules (tableau 9-2).

On remarque que la structure micronodulaire continue, dominante dans le sol rouge, se réduit d'abord à des volumes nodulaires "rechargés" en hydrates ferriques dans le sol de transition, puis à des "concrétions" enkystées dans l'horizon B 2 de sol beige. Il y a donc simultanément : transformation des structures nodulaires (dans lesquelles la concentration en hydrates ferriques augmente) et limitation de leur volume au sein d'un fond matriciel de plus en plus continu, décoloré et dominant. Cette évolution particulière, qui correspond en fait globalement à une déferrification, pourrait être appelée "évolution glébulaire". (Fig. 9.1)

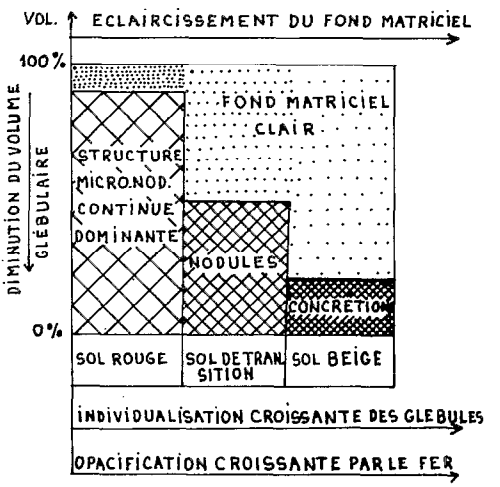


Fig. 9-1. Schéma de l'évolution glébulaire.

Elle ne caractérise pas seulement les profils de la toposéquence sous végétation forestière, mais encore ceux de la séquence d'évolution des sols rouges sous culture qui, dans ce domaine, acquièrent, quelques dizaines d'années après leur défrichement, des caractéristiques analogues à celles

Tableau 9-2.

DISTRIBUTION DES GLEBULES

MICRONODULES

SOLS / HORIZONS		ROUGE	DE TRANSITION	BEIGE
A AB B 1	APEXSOL	Micronodules disséminés abondants Remontés par la faune Rares et peu contrastés entourés d'un liseré d'argile orientée Effondrement de la structure micronodulaire.	Micronodules à distribution hétérogène Autour des bio-vides très rares estompés dans les secteurs compacts rouges dans les agrotubules	Micronodules "reliques" rares Autour des bio-vides transformés en halos glébulaires
B 2 1 B 2 2 B 3	INFRASOL	Structure micronod. continue de 1er ordre dominante + argilanes rouges + vides + fond matriciel clair	Structure micronod. limitée aux volumes nodulaires opacifiée contrastée rechargée et massive	→ Micronodule inclus dans les concrétions → Micronod. "reliques" (issus de la désagrégation des nodules. rouge clair estompés rouge sombre

NODULES

B 2 1 B 2 2 B 3	INFRASOL	rares volumes nodulaires peu différenciés au sein de la structure micronod. petits et sphériques larges et de formes irrégulières	→ Structure nodulaire discontinue de 2e ordre (formée à partir de la struc. micronod. nod. "enkystés" (20% du volume) 50% du volume nodules tendant à former une phase continue	→ Reliques de la structure nodulaire "Concrétions"

FORMES GLEBULAIRES CARACTERISTIQUES

	MICRONODULES	NODULES	"CONCRETIONS"

du sol de transition.

3) Les distributions des formes cutaniques.

Elles sont ici étroitement liées à celles des structures glébulaires dont elles ne sont parfois séparées que par des limites diffuses, tandis qu'elles en sont ailleurs parfaitement distinctes.

Ceci semble être dû au fait que les micronodules et nodules sont souvent à l'origine des cutanes (qui se forment alors par orientation, en place, des particules d'argile du plasma rouge isotrope) ; qu'ils en constituent ailleurs le support (assurant le maintien d'une porosité qui fait de leur assemblage une structure d'accueil) ; qu'ils en sont parfois aussi l'aboutissement puisque des ferri-argilanes s'incorporent à la structure micronodulaire (en totalité) et aux nodules (par leurs zonations sombres).

Les distributions observées sont indiquées schématiquement dans le tableau 9-3.

On constate l'extrême complexité de la distribution des formes cutaniques qui, bien que peu représentées en valeur relative sont étroitement liées aux structures glébulaires et dépendantes de leur évolution.

Les argilanes et ferri-argilanes présents dans les sols cultivés sont comparables à ceux du sol de transition par leur aspect et leur localisation dans le profil. Leur plus grande abondance dans les horizons de l'apexsol indiquerait une évolution relativement rapide, consécutive à la modification récente du pédoclimat par l'effet du défrichement.

4) Distribution des actions biologiques.

La faune du sol (en particulier les termites) étend son action à l'ensemble des horizons de tous les profils étudiés, jusqu'aux plus grandes profondeurs explorées.

Elle est plus intense, certes, dans les horizons superficiels entièrement pédoturbés mais son effet dans l'infrasol est surtout dépendant des limites que lui impose l'évolution glébulaire :

- inexistantes dans la structure micronodulaire du sol rouge (homogénéisée dans sa totalité),

- formées par les limites des volumes nodulaires cohérents dans le sol de transition (soustraits à la fauna-pédoturbation),

Tableau 9-3

DISTRIBUTION DES FORMES CUTANIQUES.

SOLS / HORIZONS		ROUGE	DE TRANSITION	BEIGE
A	APEXSOL	(dissociation des micronodules)	(dissociation des micronodules)	(dissociation des micronodules)
AB	APEXSOL	rares argilanes rouge jaune (illuv.)	fins argilanes jaunes en nappes subhorizontales (illuv.)	rares fins argilanes jaune orangé (lessivage)
B 1	APEXSOL	orientations autour des micronod. disséminés assimilables à des argilanes (dislocation de la structure micronodulaire)	quelques argilanes autour des fentes de retrait (illuv.)	rares argilanes jaune orangé (illuv. + accumul.)
1 B 2 2	INFRASOL	ferri. arg. distribués dans les espaces inter micronodulaires. { - rouges (illuv. + incorporés ou micronodules - orientations localisées autour des micronodules.	ferri-arg. dans et autour des nodules { -dans les fissures péri-nod. (illuv.) -dans les vides internes (orient.) (transform. de la struct. micronodulaire).	argilanes dans et autour des reliques nod. et dans le fond matr. { - enveloppant les concrétions - à limites diffuses autour des lacunes dans les reliques (orient. +départ) - à limites nettes dans le fond matr. (illuv. + départ)
B 3	INFRASOL	quelques argilanes jaune rouge associés aux vides grossiers.	ferri-argil. rouge jaune incorporés à la structure micronodulaire (illuv. + incorp.)	

Localisation dominante	Espaces intermicronodulaires	Périphérie des nodules	Fond matriciel

- réduites au pourtour des concrétions et gagnant les taches décolorées des reliques nodulaires dans le sol beige.

La distribution observée est indiquée sur le tableau 9-4.

La mise en culture modifie certainement les conditions et les modalités des actions biologiques mais ne les supprime nullement. De nombreux agrotubules actuels ont ainsi été observés dans l'infrasol des sols rouges cultivés.

c) Conclusion : variations spatiales et chronologiques des principales organisations.

Il apparaît :

1) Que ces distributions sont ordonnées,

- de bas en haut de chacun des profils étudiés
- au sein de la toposéquence, en allant des sols rouges aux sols beiges.

et qu'elles correspondent à des variations :

- de la topographie (localisation sur le plateau et relief convexe ou concave)
- de la géographie (dominance des sols rouges à structure micronodulaire au sud, et des sols beiges concrétionnés au nord)
- de la couverture végétale (passage de la forêt à la savane)
- de l'activité humaine (la déforestation et la mise en culture faisant évoluer le sol rouge "micronodulaire" en sol de transition "nodulaire").

2) Que l'ordre de ces variations est chronologique.

- Ainsi, dans chaque profil, les actions biologiques superficielles actuelles sont secondaires et dépendantes de l'organisation glébulaire pré-existante (l'importance de leur effet sur la pédogénèse ne saurait, pour cela, être sous-estimée).

- Ainsi également, d'un profil à l'autre, tandis que les constituants restent identiques, les organisations se succèdent par une série de relais et de filiations ; par exemple, la structure nodulaire de 1er ordre engendre la structure nodulaire de 2e ordre du sol de transition, qui elle-même se transforme localement en structure concrétionnée.

Tableau 9-4.

DISTRIBUTION DES ACTIONS BIOLOGIQUES.

SOLS / HORIZONS		ROUGE	DE TRANSITION	BEIGE
A	APEXSOL	Brassage intense et remontée de micronodules	Remontée de micronodules concentrés autour des biovides	Remontée de rares micronodules concentrés autour des biovides
AB	APEXSOL			Chenaux
B 1	APEXSOL	Néomatranes Agrotubules	Néomatranes Agrotubules	Néomatranes Agrotubules
1 B 2 2	INFRASOL	- Fauna-pédoturbation de la totalité du volume - Agrotubules nombreux, recoupant toutes les structures glébulaires sans modifier l'organisation des constituants	Fauna pédoturb. d'une fraction du volume (fond matriciel) 80 % Accentuation des discontinuités avec les nodules 50 % 20 %	Fauna-pédoturbation des secteurs non concrétionnés Mélange et réintégration des reliques nodulaires au fond matriciel. Agrotubules emplis de quartz et de micronodules reliques.
B 3	INFRASOL			

3) Que la signification de ces filiations observées est une transformation progressive du sol rouge en sol beige.

- Cette transformation affecte d'abord la partie supérieure des sols ferrallitiques (horizons A, AB, B 1, B 2).

- Elle est liée aux modifications (dans l'espace et/ou dans le temps) des facteurs de la pédogénèse, et plus particulièrement de ceux qui affectent les conditions pédo-hydriques :

. topographie (qui détermine en particulier les conditions de drainage)
. climat (marqué par une forte variation de l'humidité du sud au nord et par des variations annuelles et interannuelles de grande amplitude)
. couverture végétale (révèlatrice de la vulnérabilité des équilibres bioclimatiques)
. intervention humaine (perturbant profondément le régime et le bilan hydrique).

2/ - Les transformations de ces organisations.

Afin de synthétiser les données qui leur sont relatives et de rechercher les mécanismes qu'elles mettent en cause, nous les considérons, dans les deux sols extrêmes de la toposéquence (rouge et beige), à 3 niveaux d'organisation :

- celui de l'assemblage plasmique, où sont associés : kaolinite et hydrates ferriques et qui, lorsque le squelette ne joue qu'un rôle d'encombrement, détermine le comportement des matériaux,

- celui de la structure de base, regroupant fond matriciel et traits pédologiques et correspondant aux horizons,

- celui de la séquence des horizons, ou profil, résultat de la différenciation pédologique.

a) Les transformations des assemblages plasmiques.

- Elles marquent le passage du plasma rouge au plasma beige

Or, ces derniers diffèrent à la fois :

- par leur coloration et leur opacité (très faible dans le

plasma beige), caractéristiques qui semblent dépendre de l'état et de la concentration des hydrates ferriques,

- par leur isotropie ou leur anisotropie optique, indices de l'orientation des cristallites de kaolinite, plus ou moins associés aux composés du fer.

- Les mécanismes éventuels de ces transformations font intervenir toutes les causes susceptibles de modifier les liaisons interparticulaires, le mode d'association et la concentration des constituants du plasma, que celles-ci soient de nature physico-chimique (modifiant l'état des surfaces) ou chimiques (intervenant sur les concentrations), telles les ségrégations des hydrates ferriques et de la kaolinite.

- Ces transformations se répercutent sur le squelette quartzeux, dans la mesure où le plasma joue, vis-à-vis de celui-ci, le rôle de "donneur" de fer et alimente la croissance des incrustations formées dans les fissures, provoquant alors l'éclatement des quartz, puis leur morcellement ultérieur (après dissolution des ciments ferriques).

b) Les transformations à l'échelle des horizons.

- Celles qui s'effectuent par ségrégation des constituants (hydrates ferriques et kaolinite) exercent ici une action déterminante :

- leur faible importance dans le sol rouge entraîne la formation d'une structure de concentration continue (micronodulaire),

- à l'inverse, leur intervention (à partir du sol de transition) est à l'origine des structures de concentration discontinues (nodulaire et concrétionnées) qui caractérisent le sol beige.

Les concentrations glébulaires et cutaniques qui prennent ainsi naissance dans le fond matriciel, en différents niveaux du profil, caractérisent les horizons pédologiques.

- Les mécanismes éventuels de ces transformationsfont intervenir la dissociation des constituants du plasma, suivie ou non de leur ségrégation et du déplacement de leurs fractions les plus mobiles par une série de redistributions successives.

- La stabilité des organisations pédologiques dépend du devenir des matériaux ainsi dissociés :

- susceptibles dans certains cas de se réincorporer à des

structures analogues à celles dont ils proviennent (argilanes rouges dans la structure micronodulaire), assurant ainsi la réversibilité de l'évolution (caractéristique du sol rouge),

- participant ailleurs à de nouvelles organisations (du sol de transition au sol beige).

c) Les transformations à l'échelle du profil.

Elles sont directement liées aux échelles d'hétérogénéité les plus caractéristiques de chaque profil, qui correspondent :

- à la structure micronodulaire de 1er ordre du sol rouge (à différenciation peu apparente),
- à la structure nodulaire de 2e ordre de sol de transition (limitée à l'infrasol),
- aux horizons pédologiques du sol beige dans lesquels sont redistribués les constituants du fond matriciel, et localement conservées les reliques des nodules.

Les actions biologiques s'exercent également en fonction de ces échelles d'hétérogénéité qui déterminent leurs effets prédominants :

- homogénéisation dans le sol rouge
- redistribution des constituants et de la macroporosité dans le sol beige.

3/ - Conclusions : l'apport des analyses microscopiques.

L'analyse microscopique apporte une double et importante contribution à cette étude :

1) Elle met en évidence une série de filiations entre les organisations des sols beiges et rouges et révèle donc l'existence de relations génétiques au sein de la toposéquence.

2) Elle indique que les transformations essentielles se situent ici au niveau de l'assemblage plasmique, et concernent donc l'état d'association des cristallites d'argile et des hydrates ferriques. Pour l'étudier plus en détail, il convient de se placer dans des conditions plus simples que celles du milieu naturel, en abordant une approche à caractère expérimental.

Troisième Partie

ÉTUDE DES MÉCANISMES RESPONSABLES DE L'ÉTAT D'ORGANISATION ET DU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX PÉDOLOGIQUES

Introduction

A l'homogénéité de la constitution minéralogique des sols étudiés s'oppose la complexité de leur organisation, perçue par l'observation microscopique qui reconnaît, par delà la nature simple et constante des grains du squelette (formés principalement de quartz), la diversité de leurs états (plus ou moins fissurés, incrustés d'oxydesde fer, fragmentés, corrodés..) et surtout l'hétérogénéité des types d'assemblages plasmique, rendue apparente par les degrés d'anisotropie optique entre nicols croisés, interprétés comme les indices de l'orientation des grains du plasma les uns par rapport aux autres.

Il apparaît donc que les caractères déterminants portent ici, non pas sur la nature des constituants, mais sur leur état d'association et sur les liaisons qui maintiennent assemblées les particules (qu'il s'agisse des fragments issus d'un même grain de quartz ou des cristallites d'argile formant le plasma). Ces liaisons sont caractérisées par leur résistance et par leur nature. Pour les étudier, nous utiliserons successivement

deux démarches :

- la première, de type analytique (chapitre 10), consiste d'abord en un fractionnement dimensionnel des échantillons de terre tamisée, utilisant les méthodes granulométriques appliquées après divers traitements choisis de façon à exercer des actions plus ou moins agressives et spécifiques sur les liaisons interparticulaires, puis en l'étude comparative des distributions et des caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques des fractions séparées, interprétées, par référence aux données globales, pour en déduire une connaissance de l'état d'association des matériaux étudiés.
  Cette caractérisation est complétée par l'utilisation des analyses d'agrégats et de différents tests mécaniques.

- la seconde, plus synthétique (chapitre 11), utilise ces résultats pour tenter de fabriquer, de reconstituer et de transformer les assemblages plasmiques, à partir de matériau "modèle" (kaolinite de gisement), de fractions argileuses extraites du sol et d'agrégats naturels.
  Les assemblages obtenus sont comparés à ceux des sols rouge et beige, en ce qui concerne leurs caractères d'organisation et de comportement physique et physico-chimique.
  Les conséquences des transformation de l'état d'association sont ensuite envisagées, dans une optique plus dynamique, par quelques essais de fonctionnement réalisés sur des colonnes de terre.

Chapitre 10

APPROCHE D'UNE ÉTUDE DE L'ORGANISATION PAR DES VOIES ANALYTIQUES SPÉCIALES.

EXTRACTION DES DIFFÉRENTS ASSEMBLAGES CARACTÉRISTIQUES, LEUR STABILITÉ ET LEUR COHÉSION

A - UTILISATION DES ANALYSES GRANULOMETRIQUES SELECTIVES A L'ETUDE DE LA REACTIVITE DES AGGLOMERATS CARACTERISTIQUES DES SOLS.

I - RECHERCHE D'UNE METHODOLOGIE ANALYTIQUE.

1/ - Principes de la méthode adoptée.

L'objectif poursuivi ici n'est pas tant d'évaluer la composition granulométrique, chimique ou minéralogique moyenne des échantillons que de tenter d'identifier les constituants complexes les plus importants du sol et les types d'interaction qui existent entre eux, puis de déterminer les liaisons qui les intègrent en un tout organisé.

Toutes les investigations faites précédemment ont mis en évidence la complexité de certains matériaux pédologiques étudiés, manifestée :

- par la variété des assemblages, organisés en niveaux hiérarchisés à partir d'agrégats primaires et de traits pédologiques, regroupés en unités d'ordre plus élevé, et caractérisés par des liaisons internes et externes de forces et de natures diverses,
- et par les interactions et transformations qui s'y produisent en fonction des conditions d'évolution (physiques, physico-chimiques et chimiques) qui interviennent sur l'état d'association.

Pour comprendre l'origine de ces organisations complexes, il convient :

- de les "décortiquer" en les soumettant à une série de traitements plus ou moins agressifs et spécifiques,
- puis de séparer les fractions dimensionnelles ainsi obtenues en utilisant les méthodes de l'analyse granulométrique, d'évaluer leur distribution et de les identifier (du point de vue minéralogique et micromorpho-

logique),

- enfin d'interpréter comparativement ces données pour en préciser la signification.

Dans une première phase de travail, nous indiquerons toute une gamme de traitements possibles, mais nous ne retiendrons que certains d'entre eux, dont les effets sont les plus facilement interprétables, pour les appliquer aux échantillons prélevés dans les profils de la toposéquence ; une analyse plus détaillée des mécanismes mis en cause sera alors faite sur quelques échantillons caractéristiques.

2/ - Présentation des différents types de traitements utilisés.

Selon l'objectif poursuivi, il conviendrait :

- que les plus ménagés de ces traitements ne dissocient que les assemblages fragiles et permettent d'isoler ceux dont la cohérence propre dépasse un certain seuil,

- que les plus agressifs dispersent, ou même dissolvent, tout ce qui tient lieu de "liant" et aboutissent à une dissociation totale,

- qu'une gradation dans l'intensité de l'attaque mette en évidence des paliers correspondant à des résistances de plus en plus élevées.

Ces traitements sont tous appliqués aux matériaux forcés à la main[1] à travers un tamis à maille de 2 millimètres (comme en vue d'une analyse granulométrique classique).

Ils mettent en œuvre des actions physiques, physico-chimiques et chimiques diverses qui peuvent être combinées entre elles, de façon à offrir une gamme très large de possibilités. Il est possible toutefois de les classer en 5 groupes principaux indiqués sur le tableau 10-1.

1) Les traitements du premier groupe ne font intervenir que de l'eau distillée et une agitation mécanique. Ils sont donc semblables à ceux préconisés par l'U S D A (1967) et par le service des sols du Brésil (commissao de solos 1962) pour la détermination du taux d'argile "disper-

(1) La totalité du matériau est forcée à travers le tamis, ne laissant aucun refus.

Tableau 10-1.

PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT UTILISES.

Groupes de traitements	Destruction de la matière organ.	Prétraitement (attaque des ox. et hydroxydes)	Echanges ioniques	Dispersant	Agitation mécanique
1. "eau distillée"	–	–	–	–	par retournement 4 heures vibrations ultrasonores
2. D.B.	H_2O_2 "electro" pH = 4, 5	–	K Cl N/10	NH_4OH	par retournement 4 heures
	H_2O_2 "technique" pH = 1, 5	–	K Cl N/10	"	"
3. Méthode "internationale" lavages H Cl	H_2O_2 "electro" pH = 4	HCl N/10 (1tr.) HCl N/10 (3tr.) HCl percolation	H Cl N/10 "	"	"
4. "TAMM" (complexation)	H_2O_2 "electro" pH = 4	TAMM obscurité pH = 3, 4	K Cl N/10	"	"
5. Réduction	H_2O_2 "electro" pH = 4	Réduct. biolog. pH = 4, 8 "DEB" pH = 3, 6 "JEFFRIES" pH = 3, 5 à 4, 2	" " "	" " "	" " "

sable dans l'eau" et de l'"indice de floculation" (pourcentage de l'argile totale qui reste "floculée" après agitation dans l'eau distillée). Des variantes possibles portent sur le temps et les modalités de l'agitation mécanique, ou encore son remplacement par des vibrations ultrasonores.

2) Les traitements du second groupe mettent en œuvre une peroxydation de la matière organique par l'eau oxygénée, puis une saturation de l'argile par des ions K peu floculants (méthode DEMOLON et BASTISSE, 1935) et enfin l'adjonction d'ammoniaque, utilisé comme dispersant, avant de procéder à l'agitation mécanique, puis à la séparation (granulométrique) proprement dite. Ils ne diffèrent entre eux que par la qualité de l'eau oxygénée utilisée, obtenue soit par voie électrolytique (pH = 4), soit par voie chimique et stabilisée à l'acide phosphorique (pH = 1, 5).

3) Dans les traitements du troisième groupe, le déplacement des cations échangeables est obtenu par lavage en milieu acide H Cl N/10, laissé en contact durant une nuit et suivi de rinçages à l'eau distillée. Ce lavage est appliqué une fois dans un cas (méthode "internationale" type), répété trois fois dans l'autre ou remplacé par une percolation continue par une solution plus concentrée d'H Cl (méthode TOBIAS). Il exerce un double effet, d'échange cationique et de solubilisation de certains constituants labiles, ferrugineux et alumineux ; naturellement, cette dernière est d'autant plus intense que le nombre de répétitions est élevé, ou le temps de percolation prolongé.

4) Les traitements du quatrième groupe font intervenir un réactif complexant du fer et de l'aluminium, le réactif de TAMM (1922), composé d'un mélange tamponné à pH 3,4 d'acide oxalique et d'oxalate d'ammonium. La réaction étant photosensible, les extractions ont été effectuées ici à l'abri de la lumière, par agitation mécanique durant 8 heures, de façon à ne porter que sur les formes du fer les plus vulnérables et les plus actives (SCHWERTMANN, 1964-1973). Le traitement a été renouvelé une fois et suivi par des lavages K Cl N/10.

5) Les traitements du cinquième groupe enfin font intervenir la réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+}

- soit par l'action progressive des microrganismes au

cours d'une fermentation anaérobie. Le mode opératoire alors employé est inspiré des travaux de ALLISON et SCARSETH (1942) et de BETREMIEUX (1951). Des attaques répétées à l'eau oxygénée ("electro") détruisent ultérieurement les mucilages formés avant de procéder à des lavages par K Cl N/10. Une gradation dans l'intensité de l'attaque est obtenue en faisant varier la durée de 2 à 5 semaines,

- soit par la méthode "DEB" (1950) modifiée par ROBICHET (1957) : réduction par le dithionite de sodium puis lavage par H Cl N/20 (ensemble renouvelé une fois), enfin lavages alternés et centrifugations dans l'alcool éthylique, le sulfure de carbone, l'alcool méthylique, l'eau alcoolique et K Cl N/10,

- soit par la méthode "JEFFRIES" (1946) : déferrification intense par réduction à l'hydrogène naissant dans un milieu tamponné constitué par un mélange d'acide oxalique - oxalate de potassium à des pH compris entre 3,7 et 4,2.

Trois traitements successifs ont été nécessaires pour aboutir à une dissociation poussée de la fraction argileuse. Ce traitement est suivi par une série de lavages par des solutions salines, par de l'alcool et par de l'acétone, puis par K Cl N/10.

Dans tous les cas, les effets de dissociation obtenus sont appréciés dans des conditions identiques :

- La prise d'essai étant de 5 grammes les matériaux sont en fin de traitement saturés par des ions K monovalents par des lavages successifs avec K Cl N/10, débarrassés de l'excès d'électrolyte par lavage à l'eau distillée, additionnés d'ammoniaque (utilisé comme dispersant) jusqu'à pH 9,5 et soumis à 4 heures d'agitation par retournements.

- Les taux d'argile et de limon sont évalués par la méthode "pipette", puis les fractions granulométriques isolées par décantations successives (0 - 2 μ et 2 - 20 μ) et par tamisage (20 - 50 μ - 50 - 200 μ et 200 - 2000 μ).

Leurs résultats peuvent donc être valablement comparés.

Ces traitements qui mettent avant tout l'accent sur les actions physico-chimiques de surface pourraient être diversifiés à l'extrême. Ils n'ont de valeur que dans la mesure où ils permettent d'éprouver les liaisons

interparticulaires et de pouvoir séparer ainsi les principaux constituants, complexes caractéristiques des matériaux pédologiques étudiés.

3/ - Application à 3 échantillons caractéristiques des sols de la séquence étudiée : étude comparative et signification des données granulométriques obtenues.

Des traitements, correspondant aux 5 groupes indiqués ci-dessus, ont été appliqués simultanément aux trois matériaux suivants : horizon B 2 de sol rouge, horizon B 21 de sol de transition, horizon B 1 de sol beige.

Dans chaque cas, 4 répétitions ont été réalisées ; elles permettent d'apprécier la reproductibilité des taux d'argile obtenus, indiquée par un coefficient de variation, correspondant au rapport de l'écart type à la moyenne multiplié par 100.

a) Résultats obtenus.

Nous avons regroupé dans les tableaux 10-2, 10-3 et 10-4 l'ensemble des données obtenues pour chaque échantillon à l'aide des différentes méthodes.

L'examen de ces tableaux conduit à faire les remarques suivantes :

α) Le total des fractions, ajouté à l'humidité, est voisin de 100, sauf dans deux séries de cas :

- ceux correspondant au traitement à l'eau distillée ; cela pourrait être dû, soit à des phénomènes de floculation lente, soit à la poursuite de la mise en suspension au cours du lavage des sables lors des décantations successives,
- ceux correspondant aux traitements de déferrification (biologique, DEB, JEFFRIES) ; dans ce cas, il semble bien que la fraction manquante corresponde aux constituants solubilisés et extraits au cours de l'attaque, en particulier aux oxydes et hydroxydes ferriques.

β) Les répartitions granulométriques obtenues sont :

- extrêmement variables en ce qui concerne le maté-

Tableau 10-2.

CONSTITUTION GRANULOMETRIQUE %

MATERIAU MICRONODULAIRE D'HORIZON B 2 DE SOL ROUGE.

GROUPES	TRAITEMENTS	< 2 µ Argile	2 - 20 µ Limon fin	20 - 50 µ Limon gros	50 - 200 µ Sable fin	200 µ -2mm Sable gros.	Humidité	Total	Coefficient de variation de A %.
1er	"eau distillée"	2,6	15,4	17,1	38,2	28,5	1,7	93,5	> 30
2me	D.B. H_2O_2 "electro"	22,3	17,3	15,5	24,4	20,0	"	101,2	4
	Benz + D.B. H_2O_2 "electro"	23,8	19,9	16,1	23,2	15,5	"	100,2	4
	D.B. H_2O_2 "technique"	36,2	12,1	11,1	18,9	18,5	"	98,5	> 10
3me	"meth. internationale"	37,1	7,9	12,5	20,0	19,2	"	98,4	> 10
4me	"TAMM obscurité"	49,9	4,5	8,7	16,0	18,6	"	99,4	2
5me	deferrification "biol"	50,1	3,9	8,1	16,3	19,1	"	99,2	5
	" "DEB"	44,8	4,6	8,4	16,2	19,7	"	95,4	2
	" "JEFFRIES"	46,2	5,6	8,5	15,1	16,9	"	94,0	1
	Benz + deferr. "JEFFRIES"	48,2	6,2	7,9	15,0	15,5	"	94,5	1

Tableau 10-3.

CONSTITUTION GRANULOMETRIQUE %

MATERIAU NODULAIRE DE L'HORIZON B 21 DE SOL DE TRANSITION.

GROUPES TRAITEMENTS		< 2 µ Argile	2 - 20 µ Limon fin	20 - 50 µ Limon gros.	50 - 200 µ Sable fin	200 µ - 2mm Sable gros.	Humidité	Total	Coefficient de variation de A %
1er	"eau distillée"	7,6	15,9	14,8	19,2	32,5	1,2	91,2	> 30
2me	D.B. H_2O_2 "electro"	35,5	9,6	7,9	15,5	31,4	"	101,1	2
	Benz. + D.B. H_2O_2 "electro"	38,1	11,6	10,4	12,9	24,2	"	99,4	
	D.B. H_2O_2 "technique"	37,5	5,9	7,6	15,0	33,0	"	100,2	2
3me	"meth. internationale"	38,0	5,2	7,9	15,4	33,3	"	101,0	1
4me	"TAMM obscurité"	37,7	7,0	7,8	16,3	30,4	"	100,4	1
5me	deferrification "DEB"	47,2	4,2	6,8	14,2	21,9	"	95,5	1
	deferrification "JEFFRIES"	48,0	5,2	7,0	12,7	20,8	"	94,9	1
	Benz. + deferrific. "JEFFRIES"	47,5	7,3	7,8	12,5	18,2	"	94,5	1

Tableau 10-4.

CONSTITUTION GRANULOMETRIQUE %

MATERIAU DEPOURVU DE NODULES ET DECOLORE D'UN HORIZON B 1 DE SOL BEIGE.

GROUPES TRAITEMENTS		< 2 µ Argile	2- 20 µ Limon fin	20 - 50 µ Limon gros.	50 - 200 µ Sable fin	200µ - 2mm Sable gros.	Humidité	Total	Coefficient de variation de A %
1er	"eau distillée"	8,4	12,5	9,7	27,1	29,5	1,4	88,6	> 30
2me	D.B. H_2O_2 "electro"	32,8	4,7	8,6	24,8	28,3	"	100,6	< 1
	D.B. H_2O_2 "technique"	32,0	4,8	6,8	24,4	30.9	"	100,3	< 1
3me	"meth. internationale"	31,9	4,8	8,1	24,7	29,1	"	100,0	< 1
4me	"TAMM obscurité"	32,5	4,3	7,4	24,9	28,1	"	98,6	< 1
5me	Deferrification "DEB"	31,5	3,2	6,5	25,2	29,1	"	96,9	< 1
	Deferrification "JEFFRIES"	32,8	4,5	6,8	24,5	27,0	"	97,0	< 1
	Benz. + deferr. "JEFFRIES"	33,1	5,1	8,6	24,2	24,3	"	96,7	< 1

riau micronodulaire de l'horizon B 2 de sol rouge,

- variables, mais partiellement regroupées autour des valeurs fournies par la méthode "TAMM obscurité" (37,7 % d' argile) et "JEFFRIES" (48 % d'argile) dans le cas du matériau nodulaire de l'horizon B 21 de sol de transition,
- relativement constantes et indépendantes des traitements (mis à part celui à l'eau distillée) pour ce qui est du matériau sans nodule décoloré de l'horizon B 1 de sol beige.

Les variations des résultats obtenus ne sauraient être interprétées sans connaître la nature et les quantités de substances extraites par chacun des traitements utilisés.

b) Substances extraites par les différents traitements.

Il s'agit essentiellement de composés du fer et de l'aluminium, accessoirement d'un peu de silice.

Les résultats des dosages effectués sur les liquides d'extraction sont regroupés dans le tableau 10-5.

Il ressort de l'examen de ce tableau :

- que l'extraction des formes du fer est nulle (ou inférieure aux limites de sensibilité du dosage colorimétrique utilisé) dans le cas des traitements : "eau distillée" et "D. B. H_2O_2 electro", qu'elle est limitée à des traces ou à de très faibles fractions de la teneur totale lorsqu'on utilise l'eau oxygénée "technique", l'acide chlorhydrique dilué ou le réactif de "TAMM" à l'obscurité, mais qu'elle devient beaucoup plus importante dès qu'on fait appel à des actions réductrices (fermentation anaérobie, hydrogène naissant...),

- que l'extraction des formes de l'aluminium porte sur des quantités nulles ("eau distillée", "D. B. H_2O_2 electro"), très faibles ("D. B. H_2O_2 technique", "méthode internationale") ou faibles (traitement complexant seul : "TAMM", ou combiné à l'action réductrice de l'hydrogène naissant : "JEFFRIES"). Dans ce dernier cas, la quantité d'aluminium extraite est sensiblement proportionnelle à la quantité d'argile totale (de

Tableau 10-5.

QUANTITES DE SUBSTANCES EXTRAITES PAR LES DIFFERENTS TRAITEMENTS (EN % DE LA TERRE TOTALE).

MATERIAUX / TRAITEMENTS — Extraction % de	HORIZON B 2 DE SOL ROUGE			HORIZON B 21 DE SOL DE TRANSITION			HORIZON B 1 DE SOL BEIGE		
	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
eau distillée	0	0	-	0	0	-	0	0	-
"D.B. H_2O_2 electro"	0	0	-	0	0	-	0	0	-
"D.B. H_2O_2 technique"	traces	0,08	-	Traces	0,09	-	Traces	0,04	-
"méthode internationale"	0,12	0,08	-	0,14	0,07	-	0,08	0,12	-
"TAMM obscurité"	0,30	0,23	-	0,31	0,19	-	0,09	0,18	
Deferrification biologique	1,32	0,02							
Deferrification JEFFRIES	3,50	0,13	0,02	4,51	0,13	0,02	2,64	0,12	0,02
Analyse totale	4,30	16,3		4,80	17,8		3,3	14,8	

l'ordre de 0,3 % de celle-ci, quelque soit le sol.

- que le seul traitement deferrifiant qui n'entraîne pas d'extraction sensible d'aluminium est de nature biologique.

- que les relations entre les quantités de substances extraites et les taux d'argile ne sont pas proportionnelles et sont dépendantes de la nature du sol : à une extraction nulle correspondent des dispersions de l'argile limitées dans les matériaux de sol rouge et de sol de transition, totale dans celui de sol beige - une extraction très faible à faible (traitements acides et complexants) s'accompagne d'un supplément de dispersion important dans l'échantillon de sol rouge, réduit dans le sol de transition, nul dans le beige (déjà totalement dispersé) - une extraction forte du fer, faible à très faible de l'aluminium, caractérise les traitements qui provoquent la dispersion complète de l'argile dans les 3 matériaux étudiés.

Avant d'envisager le problème relatif à la signification d'un tel état de chose, il faut commencer par examiner la reproductibilité des résultats.

c) Reproductibilité des données granulométriques.

Les coefficients de variation des taux d'argile ($\frac{\text{écart type}}{\text{moyenne}} \times 100$), reportés dans la dernière colonne des tableaux, indiquent :

en ce qui concerne le matériau de l'horizon B 2 de sol rouge

- que les résultats ne sont très reproductibles qu'après traitement deferrifiant "JEFFRIES".

- que les coefficients de variation présentent cependant 3 valeurs minimales qui se situent à différents niveaux

  . la première à 22,3 % pour le traitement "D. B. H_2O_2 electro" (coef. de variation = 4)

  . la deuxième à 49,9 % pour le traitement "TAMM obscurité" (coef. de variation = 2)

  . la troisième à 46,2 % pour le traitement "JEFFRIES" (coef. de variation = 1)

- que ces coefficients atteignent des valeurs telles (>30 et >10) pour les traitements du 1er et du 3me groupe et pour "D. B. H_2O_2 technique", que les résultats correspondants semblent être dénués de signification.

en ce qui concerne le matériau de l'horizon B 21 de sol de transition

- que les résultats sont reproductibles pour tous les traitements, sauf celui du 1er groupe ;

- que cette précision accrue se manifeste à 2 niveaux autour desquels se regroupent les autres valeurs :

. "TAMM obscurité" : 37,7 %, proche des résultats obtenus avec les traitements des 2me et 3me groupes,

. "JEFFRIES" : 48 %, proche des autres résultats obtenus par les traitements du 5me groupe.

en ce qui concerne le matériau décoloré de l'horizon B 1 de sol beige

- que la reproductibilité des données granulométriques atteint ici sa valeur maximale (mis à part le traitement du 1er groupe) ;

- que les variations des résultats ont alors même ordre de grandeur, qu'il s'agisse des répétitions d'un même traitement ou du passage d'un traitement à l'autre.

Mais, les causes de la non reproductibilité de certains résultats pouvant découler, soit des modalités analytiques, soit des caractéristiques intrinsèques du matériau, nous avons donc été amenés à étudier les premières et ainsi à contrôler les critères de qualité des suspensions. D'après les travaux de BALLIF (1969), deux effets peuvent jouer à ce sujet : l'effet de concentration de la suspension et la possibilité d'une floculation lente.

α) l'effet de la concentration de la suspension ne semble pas devoir intervenir, sauf peut-être dans le cas du traitement "eau distillée" et à un moindre degré du traitement "D. B. H_2O_2 electro" pour l'échantillon micronodulaire de sol rouge. Avec une prise d'essai de 5 grammes, nous nous situons en effet dans les limites les plus favorables pour des taux d'argile supérieurs à 30 %. Une concentration d'argile très faible contribue probablement à l'imprécision des résultats fournis par le traitement à l'eau distillée.

β) l'effet de l'existence d'une floculation lente peut être aisément vérifié grâce à une méthode de contrôle : selon la loi de "SCHLOESING" deux prélèvements effectués à des hauteurs de chute différentes (h 1 et h 2), aux temps donnés (t 1 et t 2) doivent fournir des résultats semblables si la

relation suivante est respectée : $\frac{h\,1}{t\,1} = \frac{h\,2}{t\,2}$ = constante, c'est-à-dire si la vitesse de chute reste constante.

D'après CAILLERE et HENIN (1963), lorsque cette relation est observée, on peut admettre que les particules ne sont pas affectées par la floculation lente et considérer la suspension comme stable (ce qui est une condition nécessaire à la réalisation de toute séparation granulométrique par décantation).

Des prélèvements effectués systématiquement 5 et 10 heures après agitation sur des suspensions obtenues par les différents traitements ont montré :

- que les variations introduites par le doublement du temps et de la profondeur ne sont importantes que dans le cas du traitement à l'eau distillée (variation relative : - 36 %),

- mais qu'elles restent inférieures ou égales à l'intervalle de confiance dans les autres cas.

De ce fait, mis à part le traitement à l'eau distillée, la non reproductibilité dépend le plus généralement des caractéristiques intrinsèques des matériaux.

En définitive, l'utilisation des différentes méthodes d'analyse granulométrique permet de distinguer deux cas :

- le premier où les résultats ne sont pas reproductibles (méthode D. B. H_2O_2 technique et méthode internationale pour le matériau micronodulaire de sol rouge), car les prétraitements ne conduisent pas à une désagrégation et une dispersion qui correspondent effectivement à un état représentatif du matériau constituant le sol.

- le second dans lequel les résultats sont toujours reproductibles (méthode "D. B. H_2O_2 electro" - méthode "TAMM obscurité" - prétraitements "DEB" et "JEFFRIES"). Mais ils ne sont pas pour autant nécessairement identiques.

Ainsi plusieurs possibilités se présentent :

+ Dans le cas du matériau de l'horizon B 2 de sol rouge,

- les taux d'argile obtenus à partir des échantillons non déferrifiés correspondent à deux paliers de dispersion :

- l'un proche de 23 % d'argile résulte du traitement

"D. B. H_2O_2 electro"

- l'autre, voisin de 50 % d'argile, est obtenu après traitement "TAMM obscurité",

- ceux qui sont déterminés après déferrification (traitements "DEB" et "JEFFRIES") mettent en évidence un seul palier vers 45 %.

+ Dans le cas du matériau de l'horizon B 21 de sol de transition,

- les taux d'argile séparée à partir des échantillons non déferrifiés conduisent à un seul palier, vers 38 % d'argile (après traitement "TAMM obscurité") à peine supérieur à celui obtenu par le traitement "D. B. H_2O_2 electro",
- ceux qui sont déterminés après déferrification (traitements "DEB" et "JEFFRIES") sont groupés autour d'un palier sensiblement supérieur (48 %).

+ Dans le cas du matériau décoloré de l'horizon B 1 de sol beige, enfin,

- les taux d'argile obtenus correspondent à un seul palier, vers 32 % (le taux d'argile n'étant pas modifié de façon appréciable par le traitement déferrifiant).

Ces paliers sont également caractérisés par des distributions dimensionnelles différentes des fractions limoneuses et sableuses.

Comparant ces dernières, obtenues après traitement "D. B. H_2O_2 electro", directement ou après déferrification préalable (fig. 10-1.), nous constatons ainsi que les gains de la fraction argileuse s'effectuent surtout aux dépens

- des limons et sables fins (2 à 200 µ) dans le matériau de l'horizon B 2 de sol rouge,
- des sables fins et surtout grossiers (50 à 2000 µ) dans le matériau de l'horizon B 21 du sol de transition.

Il s'agit maintenant de réflèchir à la signification réelle des paliers, mais à cet effet il convient au préalable d'établir la constitution minéralogique et, si possible micromorphologique, de toutes les fractions séparées.

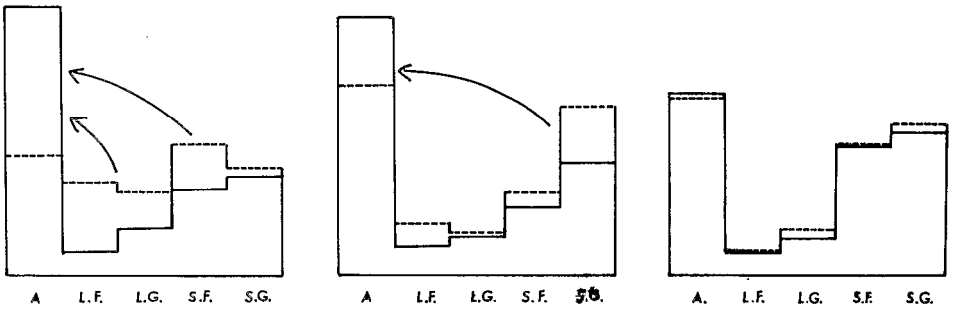


Fig. 10-1 - Distributions granulométriques obtenues par la méthode "D. B. H_2O_2 électro" directement---- après traitement JEFF.—

d) Caractérisation minéralogique et micromorphologique des diverses fractions granulométriques.

α) Constitution minéralogique

Son étude est facilitée par la présence presque exclusive de kaolinite (associée à des hydrates ferriques) et de quartz dans les matériaux pédologiques étudiés et donc dans toutes les fractions séparées.

Elle a été réalisée par les techniques d'analyse thermogravimétrique et thermique différentielle (fig. 10-2).

Les premières permettent de réaliser une évaluation minéralogique quantitative. A cet effet, on attribue le domaine de perte de poids compris entre 425° et 700° à la deshydroxylation de la kaolinite et l'on évalue la teneur correspondante à ce minéral dans chaque fraction, en admettant que la kaolinite pure perd 13,7 % de son poids lors de la deshydratation.

Les résultats obtenus pour chaque fraction séparée à partir des 3 échantillons considérés permettent d'établir un bilan minéralogique des séparations granulométriques pratiquées par les différentes méthodes. Ils sont regroupés dans les tableaux 10-6, 10-7, 10-8.

Les teneurs en kaolinite ont été par ailleurs déterminées sur les échantillons entiers ; elles s'élèvent respectivement à 40 - 40,5 et 27,2 %, soit à des valeurs proches de celles obtenues par addition des taux de kaolinite contenus dans chaque fraction, exprimés en % du total, ce qui confirme la signification des évaluations faites.

1) Il apparaît, à l'examen de ce tableau, que 42,7 % seulement de la kaolinite de l'échantillon de sol rouge sont séparés dans la fraction granulo-

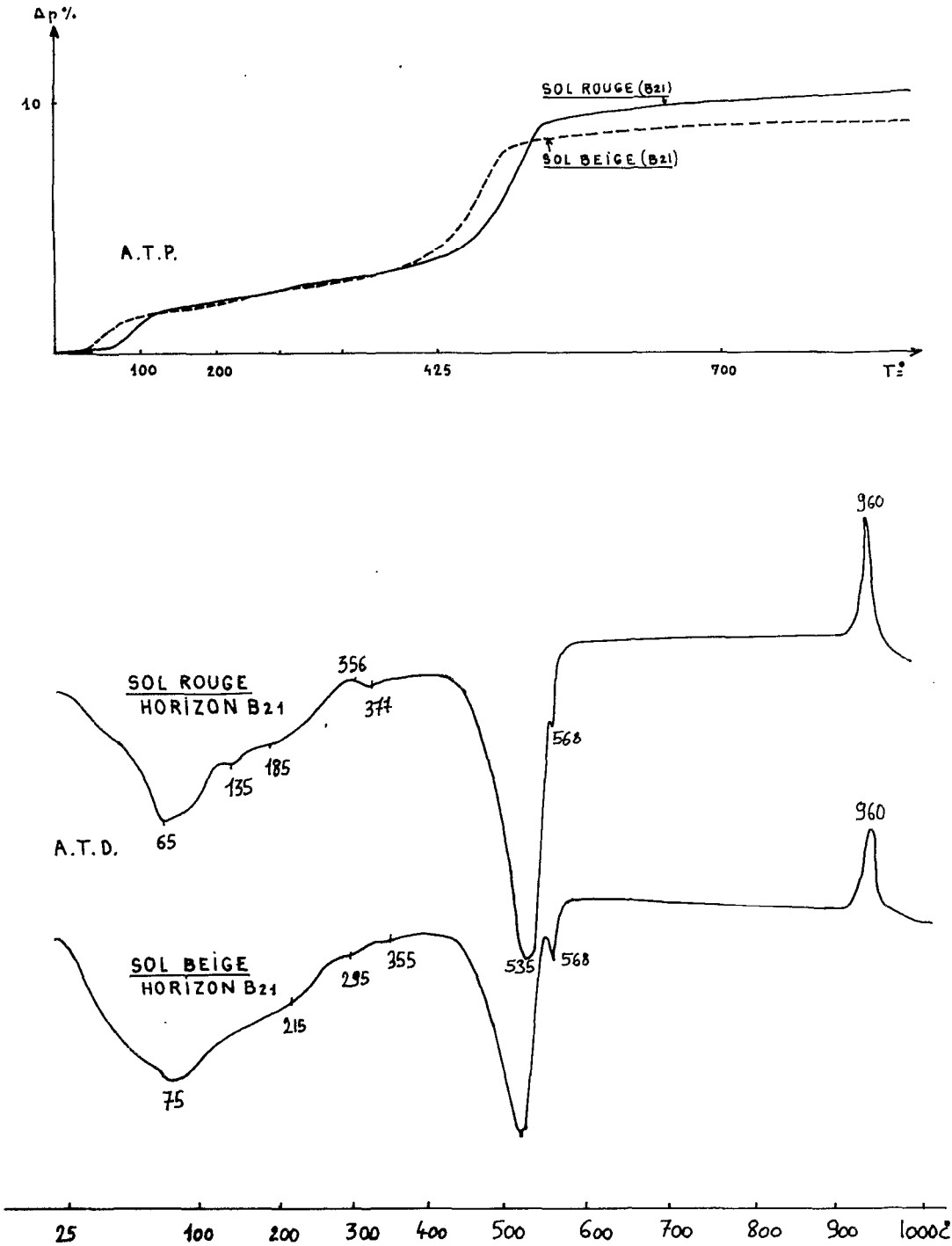


Fig. 10-2 - Courbes d'analyse thermogravimétrique et thermique différentielle.

Tableau 10-6.

TENEURS EN KAOLINITE DE CHAQUE FRACTION GRANULOMETRIQUE OBTENUE PAR LES DIFFERENTES METHODES A PARTIR DE L'ECHANTILLON DE SOL ROUGE.

TRAITEMENTS	FRACTIONS :	ARGILE (<2 µ)	LIMON F. (2 - 20 µ)	LIMON G. (20 - 50 µ)	SABLE F. (50-200 µ)	SABLE G. (200-2000 µ)	TOTAL
D.B. H_2O_2 ELECTRO	Granulométrie	22,3	17,3	15,5	24,4	20,0	
	Kaolinite % de la fraction	77,5	48,0	35,0	29,0	12,0	
	Kaolinite de la fraction % de l'échantillon	17,3	8,3	5,4	7,1	2,4	40,5
	Répartition de la kaolinite dans les fractions %	42,7	20,5	13,3	17,6	5,9	100
TAMM OBSCURITE	Granulométrie	49,9	4,5	8,7	16,0	18,6	
	Kaolinite % de la fraction	77,0	8,0	2,0	1,0	1,0	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	38,4	0,4	0,2	0,2	0,2	39,4
	Répart. kaol. dans les frac. %	97,5	1	0,5	0,5	0,5	
DEB	Granulométrie	44,8	4,6	8,5	16,2	19,7	
	Kaolinite % de la fraction	89	0	0	0	0	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	39,9	0	0	0	0	39,9
	Répart. kaol. dans les frac. %	100	0	0	0	0	100
JEFFRIES	Granulométrie	46,2	5,6	8,5	15,1	16,0	
	Kaolinite % de la fraction	85	0	0	0	0	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	39,3	0	0	0	0	39,3
	Répart. kaol. dans les frac. %	100	0	0	0	0	100

Tableau 10-7.

TENEURS EN KAOLINITE DE CHAQUE FRACTION GRANULOMETRIQUE OBTENUE PAR LES DIFFERENTES METHODES, A PARTIR DE L'ECHANTILLON DE MATERIAU NODULAIRE DE SOL DE TRANSITION.

TRAITEMENTS	FRACTIONS :	ARGILE ($<2\mu$)	LIMON F. (2 - 20 μ)	LIMON G. (20 - 50 μ)	SABLE F. (50-200 μ)	SABLE G. (200 - 2000 μ)	TOTAL
D. B. H_2O_2 ELECTRO	Granulométrie	35, 5	9, 6	14, 8	19, 2	32, 5	
	Kaolinite % de la fraction	75, 0	35, 0	8, 7	13, 8	23, 0	
	Kaol. de la frac. %de l'échan.	26, 6	3, 4	1, 3	2, 6	7, 5	41, 4
	Répart. kaol. dans les fract.	64, 3	8, 2	3, 1	6, 3	18, 1	100
TAMM OBSCURITE	Granulométrie	37, 7	7, 0	7, 8	16, 3	30, 4	
	Kaolinite % de la fraction	76	15	8	13	24	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	28, 7	1, 1	0, 6	2, 1	7, 3	39, 8
	Répart. kaol. dans les fract.	72, 2	2, 8	1, 5	5, 2	18, 3	100
DEB	Granulométrie	47, 2	4, 2	6, 8	14, 2	21, 9	
	Kaolinite % de la fraction	85	0	0	0	1	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	40, 1	0	0	0	0, 2	40, 3
	Répart. kaol. dans les fract.	99, 5	0	0	0	0, 5	100
JEFFRIES	Granulométrie	48, 0	5, 2	7, 0	12, 7	20, 8	
	Kaolinite % de la fraction	84	0	0	0	0	
	Kaol. de la frac. % de l'échan.	40, 3	0	0	0	0	40, 3
	Répart. kaol. dans les fract.	100	0	0	0	0	100

Tableau 10-8.

TENEURS EN KAOLINITE DE CHAQUE FRACTION GRANULOMETRIQUE OBTENUE PAR DIFFERENTES METHODES A PARTIR DE L'ECHANTILLON DE SOL BEIGE.

MATERIAU SANS NODULE, DECOLORE, DE L'HORIZON B 1 DE SOL BEIGE.

TRAITEMENTS	FRACTIONS :	ARGILE ($<2\mu$)	LIMON F. (2 - 20 μ)	LIMON G. (20 - 50 μ)	SABLE F. (50-200 μ)	SABLE G. (200 - 2000 μ)	TOTAL
D.B. H_2O_2 ELECTRO	Granulométrie	32,8	4,7	8,6	24,8	28,3	
	Kaolinite % de la fraction	76,5	9,5	3,6	3,6	2,5	
	Kaol. de la frac. % de l'échant.	25,1	0,4	0,3	0,9	0,7	27,4(1)
	Répart. kaol. dans les fract.	91,6	1,5	1,1	3,2	2,6	100,0
TAMM OBSCURITE	Granulométrie	32,5	4,3	7,4	24,9	28,1	
	Kaolinite % de la fraction	77,0	3,0	0	3	2	
	Kaol. de la frac. % de l'échant.	25,1	0,1	0	0,7	0,6	26,5(1)
	Répart. kaol. dans les fract.	94,7	0,4	0	2,6	2,3	100,0
DEB	Granulométrie	31,5	3,2	6,5	25,2	29,1	
	Kaolinite % de la fraction	84,0	0	0	0	1	
	Kaol. de la fraction % de l'échan.	26,5	0	0	0	0,3	26,8 (1)
	Répart. kaol. dans les fract.	98,9	0	0	0	1,1	100,0
JEFFRIES	Granulométrie	32,8	4,5	6,8	24,5	27,0	
	Kaolinite % de la fraction	83,0	0	0	0	0	
	Kaol. de la frac. % de l'échant.	27,2	0	0	0	0	27,2(1)
	Répart. kaol. dans les fract.	100,0	0	0	0	0	100,0

métrique argileuse, par la méthode "D. B. H_2O_2 electro", le restant étant réparti dans les fractions limoneuses et sableuses de diamètre inférieur à 200 µ.

Le traitement "TAMM obscurité" augmente très fortement la dispersion qui affecte alors 97, 5 % du total.

Le traitement déferrifiant "DEB" qui complète cet effet ne porte que sur 2, 5 % de la kaolinite totale.

La déferrification faite selon la méthode "JEFFRIES" provoque des variations granulométriques qui ne peuvent correspondre qu'aux effets d'une pulvérisation des quartz, consécutive à une déferrification poussée, suffisamment fine pour qu'une partie de ses produits soient recueillis avec la fraction granulométrique argileuse.

2) En ce qui concerne l'échantillon de matériau nodulaire de sol de transition, le pourcentage de la kaolinite totale séparé dans la fraction granulométrique argileuse après traitement "D. B. H_2O_2 electro" est sensiblement plus élevé (64, 3 %), mais il n'est que faiblement accru par le traitement "TAMM obscurité" (72, 2 %) dont l'effet s'exerce uniquement sur la dissociation des assemblages de la taille des limons et sables fins, sans affecter les plus grossiers.

3) Dans l'échantillon décoloré de sol beige, enfin, la plus grande partie de la kaolinite (91, 6 %) est séparée dans la fraction argileuse après traitement "D. B. H_2O_2 electro". La partie restante semble être englobée dans des assemblages très résistants, puisque même le traitement déferrifiant "DEB" ne parvient pas à les dissocier entièrement. Les plus fortes variations granulométriques affectent les sables et correspondent aux effets d'une pulvérisation des quartz les plus grossiers.

x

x x

Il ressort de l'ensemble de ces données que si la plus grande partie de la kaolinite contenue dans le sol rouge (57, 3 %) est réfractaire à l'action dispersante de traitements, tels que "D. B. H_2O_2 electro" qui interviennent principalement sur les charges superficielles compensées par des ions

alcalins ou alcalino-terreux échangeables, elle est cependant facilement libérée, dans sa presque totalité, par un réactif complexant, employé dans les conditions les moins favorables à son activité (obscurité), seulement apte à solubiliser les formes les plus actives (dans le domaine physico-chimique) et les plus vulnérables du fer (SCHWERTMANN, 1964).

A l'inverse, les quantités moindres de la kaolinite totale, réfractaire à l'action du traitements "D. B. H_2O_2 electro" dans l'échantillon de sol de transition et celui de sol beige sont incluses dans des assemblages plus résistants qui ne peuvent être dissociés que par l'effet de traitements déferrifiants énergiques.

A un blocage dominant mais vulnérable dans le premier cas, s'opposerait ainsi une cimentation plus résistante, limitée à une fraction réduite des constituants argileux.

h) Caractérisation micromorphologique.

1) Sables séparés à partir du sol rouge, examinés à la loupe binoculaire : ils apparaissent

- après traitement "D. B. H_2O_2 electro" comme étant composés de deux types de particules :
  - . des grains de quartz, assez propres, de formes diverses, généralement arrondis, souvent incrustés d'oxyde de fer,
  - . des micronodules (ou assemblages de micronodules), rouges, de formes arrondies, poreux, contenant de petits grains de quartz inclus dans leur masse. Leurs dimensions sont de l'ordre de la centaine de microns (moins lorsqu'il s'agit de fragments, plus lorsqu'ils sont accolés) ;

- après traitement "TAMM obscurité", ils sont, en presque totalité composés de grains de quartz arrondis auxquels s'adjoignent de petits fragments rouges de formes irrégulières ;

- après traitement "JEFFRIES", les quartz présentent une proportion accrue de fragments anguleux.

2) Sables séparés à partir de l'échantillon de matériau nodulaire de sol de transition :

- après traitement D. B. H_2O_2 electro, ils sont composés de trois types de particules :

  . les deux premiers sensiblement identiques à ceux du sol rouge,

  . le troisième correspondant à des fragments grossiers (ϕ>200 u), d'un rouge plus sombre, localement compacts, incluant des grains de quartz fins et grossiers.

- après traitement "TAMM obscurité", seuls subsistent les quartz et les fragments de nodules ;

- après traitement "DEB", les quartz sont seuls représentés;

- après traitement "JEFFRIES", ils s'enrichissent en fragments anguleux.

3) Sables séparés à partir de l'échantillon de sol beige.

- après traitement "D. B. H_2O_2 electro" et "TAMM", ceux-ci sont essentiellement composés de quartz corrodés, fissurés et souvent recouverts d'une pellicule ferrugineuse, auxquels s'ajoutent de petits nodules ou fragments rouge sombre à opaque (comparables aux micronodules de 2e génération) ;

- après traitement "DEB", ces derniers deviennent beaucoup plus rares et partiellement décolorés ;

- après traitement "JEFFRIES", ils disparaissent totalement et seuls subsistent les grains de quartz, plus ou moins fragmentés.

En définitive, ces observations révèlent que les assemblages caractérisés par des réactions différentes aux traitements dissociants utilisés, présentent des morphologies également différentes, identifiables à celles qui ont été décrites au cours de l'étude microscopique.

La simple comparaison des taux d'argile dispersée et des données microscopiques montre (Tab. 10-9, p. 322) ainsi que :

- les micronodules caractéristiques du sol rouge sont vulnérables au traitement "TAMM obscurité" ;

Tableau 10-9

QUANTITES D'ARGILE DISPERSEE

ET ORGANISATIONS MICROSCOPIQUES.

TRAIT. ECHANT.	ARGILE DISPERSEE			ORGAN. MICRO.
	D. B. H_2O_2 electro	Tamm obscurité	Deb	Glébules
B 2 sol rouge	22, 3	49, 9	44, 8 (+3, 5 de Fe_2O_3)	micronodules
B 21 sol de trans.	35, 5	37, 7	47, 2 (+4, 5 de Fe_2O_3)	nodules
B 1 sol beige	32, 8	32, 5	31, 5 (+2, 6 de Fe_2O_3)	pas de micro-nodules ni de nodules

- à l'inverse sont réfractaires à ce traitement les nodules et concrétions du sol de transition qui ne sont dissociés qu'après déferrification.

- ne sont totalement dissociés par le traitement le moins agressif ("D. B. H_2O_2 electro") que les plasmas des fonds matriciels (seuls représentés dans le sol beige) et des argilanes non réincorporés aux micronodules.

On remarque en particulier que seules sont vulnérables au traitement "TAMM obscurité" les organisations micronodulaires au sein desquelles l'observation microscopique a mis en évidence des transformations réversibles de l'assemblage, manifestées notamment par la réincorporation des argilanes rouge au plasma dense isotrope (de la structure micronodulaire). Cette vulnérabilité caractérise donc une fraction de l'argile dont les assemblages sont stables vis-à-vis de l'eau et des réactifs classiques d'échange cationique (seulement susceptibles de provoquer des dissociations réversibles), mais sont dispersés par les traitements qui exercent leur action sur les formes du fer les plus actives dans le domaine physico-chimique.

Ainsi, trois des traitements utilisés ("D. B. H_2O_2 electro",

"TAMM obscurité" et "JEFFRIES") lors des analyses granulométriques sélectives, permettent d'établir une distinction entre 3 sortes de plasma qui sont caractérisées par des réactivités et des degrés de mobilité différents, et qui en outre semblent correspondre tout à fait aux divers modes d'organisation, tels qu'ils ont été mis en évidence lors des études macro et surtout micromorphologiques.

Dans ces conditions, il devient possible de les utiliser pour faire une approche fonctionnelle et quantitative des phénomènes d'organisation du plasma, en les appliquant aux profils caractéristiques des séquences de sol étudiées.

II - APPLICATION A QUELQUES PROFILS CARACTERISTIQUES - RESULTATS ET INTERPRETATION.

1/ - Application à divers sols des séquences étudiées.

a) Les sols de la toposéquence.

Les taux d'argile dispersée ($\phi < 2\mu$) obtenus par les 3 méthodes ("D. B. H_2O_2 electro", "TAMM" et "JEFFRIES") à partir des divers échantillons d'un sol rouge, d'un sol de transition et d'un sol beige ont été reportés sur le graphique (fig.10-3), de même que les taux de kaolinite évalués par analyse thermogravimétrique.

Les variations verticales font apparaître dans chacun des profils considérés 3 secteurs :

- le premier caractérisé par une relative concordance des 3 séries de données, s'étend à la plus grande partie des horizons A, AB et B 1 (apexsol),
- le deuxième dans lequel les taux d'argile "D. B. H_2O_2 electro" diminuent de haut en bas, alors qu'augmentent les teneurs en argile dispersée par les méthodes plus agressives ("TAMM" et/ou "JEFFRIES"),
- le troisième marqué par des fluctuations des valeurs obtenues, séparées par des écarts d'importances diverses (3).

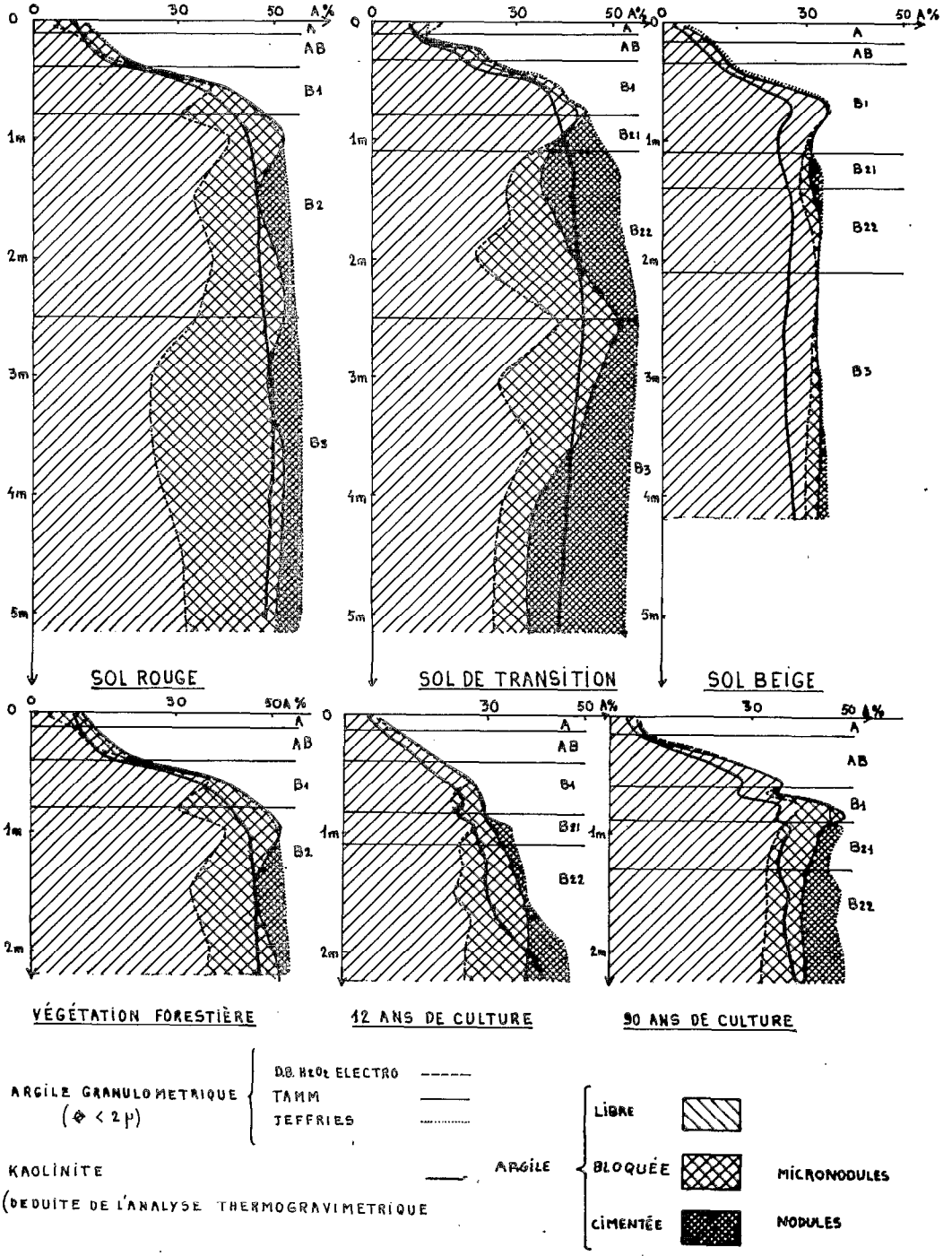


Fig. 10-3 - Taux d'argile granulométrique et de kaolinite dans 3 sols de la toposéquence, et 3 sols rouges de la séquence de transformation sous culture.

Les variations latérales révèlent, en allant des sols rouges vers les sols beiges :

- la concordance croissante des quantités d'argile dispersées par les 3 méthodes, depuis la surface jusqu'à des profondeurs de plus en plus grandes (secteur 1) : 55 cm dans le sol rouge, 80 cm dans le sol de transition, 110 cm dans le sol beige ; faisant coïncider dans ce dernier le maximum d'argile facilement dispersée avec le maximum d'argile totale,

- la relative constance des quantités d'argile dispersées par le traitement "D. B. H_2O_2 electro" (toujours de l'ordre de 30 % $\pm$ 10 dans les horizons B 2, B 22 et B 3), atteignant des valeurs supérieures dans l'horizon B 1 de sol de transition (*),

- les écarts différents entre les résultats fournis par les 3 méthodes, surtout marqués dans les horizons B 2, B 21, B 22, B 3

  . importants dans le sol rouge, particulièrement entre les taux d'argile dispersée par les traitements "D. B. H_2O_2 electro" et "TAMM",

  . plus fluctuants dans le sol de transition et portant particulièrement sur la différence entre les traitements "TAMM" et "JEFFRIES",

  . réduits dans le sol beige.

Cette variation fait ainsi apparaître un ajustement croissant, de haut en bas des taux d'argile correspondant aux différents états d'immobilisation, dont les valeurs maximales finissent par se confondre au niveau du sol beige.

b) Les sols de la séquence de transformation des sols rouges par la culture.

Les variations verticales et latérales des quantités d'argile dispersées par les 3 traitements utilisés y affectent une couche de sol de près de 2 mètres de profondeur. Elles sont représentées sur la fig. 10-3.

---

* Tout se passe comme si les taux d'argile facilement dispersable se stabilisaient dans les sols à des valeurs comparables quelles que soient par ailleurs les quantités d'argile immobilisée.

On remarque que :

- dans l'apexsol, la concordance des 3 séries de données s'accentue, avec l'ancienneté de la mise en culture, affectant là encore des profondeurs croissantes : limitée, dans le sol sous forêt, au niveau d'un maximum (dans l'horizon B 1 qui ne porte que sur la fraction la plus dispersable ; développée, dans le sol cultivé depuis 90 ans, où se dessine un accroissement par crochets successifs, discernable sur les 3 séries de mesures,

- dans les horizons B 2, B 21 et B 22, les écarts entre les taux d'argile dispersée par les traitements "D. B. H_2O_2 electro" et "TAMM" tendent à se réduire, alors qu'augmentent les quantités supplémentaires d'argile libérées par le traitement deferrifiant "JEFFRIES",

- cette double évolution a pour conséquence de renforcer le contraste entre l'apexsol dans lequel les teneurs en argile entièrement dispersable augmentent "en marches d'escalier" avec la profondeur, et les horizons B 21 et B 22 caractérisés par des degrés différents de "blocage" ou de forte immobilisation d'une partie des constituants argileux.

Là encore est donc observée une certaine convergence entre les variations latérales décelées dans la toposéquence et les transformations progressives consécutives à la mise en culture : tout se passe comme si les modifications de la distribution verticale de l'argile affectaient d'abord la seule fraction la plus dispersable de l'apexsol, puis s'imposaient progressivement, de haut en bas, à l'ensemble des fractions tandis que se développe une nouvelle différenciation texturale de l'ensemble du profil (cf. chap. 3).

Les taux de kaolinite, déterminés par analyse thermogravimétrique, portés en surcharge des graphiques, sont, en première approximation, proportionnels aux taux d'argile "JEFFRIES". Ilsfont apparaître la distribution verticale du minéral argileux, très régulière dans le sol rouge sous forêt, progressivement redessinée à mesure qu'on se déplace vers le sol beige, ou que l'ancienneté s'accroît depuis la date du défrichement.

2/ - Etude comparative de la constitution des fractions isolées par les différentes méthodes ; leur variation verticale, sa signification.

L'analyse porte ici :

- sur les fractions argileuses, plus ou moins dispersables, séparées par les diverses méthodes utilisées d'analyse granulométrique,

- sur les assemblages réfractaires aux traitements précités, de la dimension des sables, séparés des grains de quartz par décantation dans un mélange alcool-bromoforme de densité 2, 55 pour ce qui est des micronodules (apparemment moins denses que le quartz), et de densité 2, 68 pour ce qui est des fragments de nodules (plus denses que le quartz),

- sur les nodules de dimensions centimétriques, séparés à la main.

a) Constitution des fractions argileuses.

Les argiles extraites ont été soumises aux méthodes d'analyse thermo-gravimétrique et chimique, leur teneur en quartz étant déterminée par la méthode de KILLY et JACKSON (1965) et leur constitution minéralogique précisée à l'aide de l'analyse thermique différentielle et de la diffraction aux rayons X.

α) Dans les argiles extraites par la méthode "D. B. H_2O_2 electro" sont mis en évidence (par ces moyens d'investigation) : de la kaolinite (très largement dominante), des hydroxydes de fer amorphes (non identifiables aux rayons X)(1) et de petites quantités de quartz (principalement dans les fractions argileuses extraites du sol beige).

Les données quantitatives caractéristiques des argiles ainsi extraites du sol rouge et du sol beige, sont regroupées dans le tableau 10-10.

On remarque :

- des teneurs en kaolinite assez constantes dans les argiles extraites des 2 sols, à partir de 60-70 cm (un peu plus fortes toutefois dans le sol beige que dans le rouge),

---

(1) Des diagrammes établis dans les laboratoires des services scientifiques centraux de l'O. R. S. T. O. M. à la demande de FAUCK, révèlent dans des échantillons d'argile extraits de sols rouges similaires, de la région de Séfa, la présence d'hématite et de traces de gœthite.

Tableau 10-10

CONSTITUTION DES FRACTIONS ARGILEUSES EXTRAITES DU SOL ROUGE ET DU SOL BEIGE PAR LA METHODE "D.B. H_2O_2 ELECTRO" (EXPRIMEES EN % DE LA FRACTION ARGILEUSE).

	KAOLINITE (A.T.G.) (1)		Fe_2O_3 (Anal. chimique) (2)		QUARTZ (meth. KILLY et JACKSON) (3)		TOTAL : 1 + 2 + 3 + HUMIDITE (à 100°)	
	ROUGE	BEIGE	ROUGE	BEIGE	ROUGE	BEIGE	ROUGE	BEIGE
0 - 10 cm	67,8	70,2	9,7	6,9	2,20	3,20	81,20	81,00
20 - 30 cm	73,8	75,0	9,1	7,3	0,70	3,60	84,60	87,20
60 - 70 cm	75,6	76,5	8,4	4,5	0,65	2,30	86,75	87,40
80 - 90 cm	76,0	80,3	8,5	5,1	0,55	2,50	87,15	88,90
140 - 160 cm	77,5	81,5	9,5	6,3	0,45	1,60	88,55	90,40
160 - 200 cm	76,2	81,5	10,4	6,1	0,40	0,70	88,80	89,70

- des teneurs en Fe_2O_3 plus élevées dans les argiles de sol rouge ($>$ 11 % du taux de kaolinite) que dans celles du sol beige ($<$ 10 % du taux de kaolinite), marquant un minimum dans les deux profils au niveau de l'horizon B 1,

- des teneurs en quartz faibles et limitées à l'horizon superficiel dans le sol rouge, plus importantes jusqu'au niveau de l'horizon B 1 dans le sol beige,

- des valeurs totales (kaolinite + Fe_2O_3 + quartz + humidité), qui sont loin d'atteindre 100 %. Si une partie de la différence correspond à l'eau de constitution des hydroxydes, celle-ci ne dépasse pas cependant 1 % (sur les courbes thermogravimétriques). Il existe donc une fraction complémentaire qui n'est identifiable ni par les méthodes thermiques, ni par diffraction aux rayons X. Des valeurs du paramètre moléculaire $Ki = \frac{Si.O_2}{Al_2O_3}$ (déterminées sur les produits solubilisés après fusion), comprises entre 2, 13 et 2, 33 * laissent supposer la présence de silice non combinée, sous forme de quartz fortement altéré et très finement divisé, solubilisé par le pyrosulfate de sodium et donc non directement assimilée au quartz dans la méthode de KILLY et JACKSON.

La composition de l'argile extraite après traitement "TAMM" diffère peu de celle de la fraction séparée par la méthode "D. B. H_2O_2 electro".

En ce qui concerne le sol rouge, bien que les quantités d'argile dispersées soient à certains niveaux doublées, et que le traitement se manifeste par une faible extraction de fer (0, 3 de Fe_2O_3 % de l'échantillon total), les teneurs en kaolinite, en fer et en quartz ne présentent aucune variation suffisante pour donner lieu à une interprétation ($\pm$ 3 % en valeur relative). Dans le sol beige, le supplément de dispersion et l'extraction du fer étant faibles, il est normal que la composition de l'argile extraite soit inchangée.

---

* Cette valeur du Ki serait à rapprocher de celle, plus proche de 2 obtenue après attaque triacide (chap. 7-1). La différence peut être attribuée à une plus grande efficacité du pyrosulfate sur les produits mal cristallisés riches en silice.

½) La composition de l'argile extraite après traitement JEFFRIES manifeste, en premier lieu, les effets de la deferrification par l'hydrogène naissant : les teneurs en Fe_2O_3 résiduel ne sont que de l'ordre de 1 % dans l'argile du sol rouge et de 0, 6 % dans celle du sol beige. La prédominance de la kaolinite s'en trouve accrue, mais elle est cette fois plus forte et plus régulière dans le sol rouge (84 à 88 % dans l'ensemble des horizons B 1, 75 % dans les horizons AB et A) que dans le beige (80 à 84 % dans l'horizon B 2, 77 % dans l'horizon B 1, 68 % dans l'horizon AB et près de 50 % dans l'horizon A). Cet état de chose ne peut être expliqué que par deux effets différents du prétraitement "JEFFRIES" : enrichissement relatif en kaolinite par extraction des oxyhydrates de fer (plus marqué dans le sol rouge) et dilution de la kaolinite par les produits d'une nouvelle micropulvérisation des quartz (plus forte dans le sol beige). Le dosage par la méthode de KILLY et JACKSON révèle alors la présence de 3 % de quartz dans l'argile déferrifiée du sol rouge et de 4 à 7 % dans celle du sol beige.

De l'ensemble de ces données, nous retiendrons que les fractions argileuses plus ou moins dispersables extraites des deux sols étudiés ici (correspondants aux profils extrêmes de la toposéquence) présentent des caractéristiques semblables, qui laissent supposer une origine commune, mais diffèrent par leurs teneurs en oxyhydrates de fer (élevées et régulières dans les argiles du sol rouge, moindres et fluctuantes dans celles du sol beige) et par leur enrichissement en quartz micropulvérisé (marqué dans l'horizon superficiel du sol rouge mais affectant l'ensemble de l'apexsol du sol beige).

Aucune de ces caractéristiques ne peut cependant être directement reliée aux variations de la réactivité des agglomérats. Notons toutefois que l'analyse n'a porté ici que sur les fractions dissociées par les traitements, éventuellement débarassées des substances qui s'opposaient à leur dispersion (particulièrement en ce qui concerne les traitement déferrifiants). Il convient donc d'étudier maintenant les assemblages réfractaires aux actions utilisées pour tenter de déterminer les causes de leur résistance.

b) Etude des particules complexes (ou "pseudoparticules") contenues dans les fractions sableuses.

Elles correspondent en fait à des assemblages réfractaires au méthodes de dispersion utilisées.

Nous analyserons successivement celles qui ont résisté :

- au traitement "D. B. H_2O_2 electro"
- au traitement "TAMM".

Outre les méthodes d'investigation chimiques et minéralogiques, nous utiliserons ici l'analyse granulométrique et l'observation microscopique.

α) Les pseudoparticules obtenues après traitement "D. B. H_2O_2 electro", dans le cas du sol rouge ont déjà été identifiées comme étant des micronodules, isolés, fragmentés ou accolés les uns aux autres.

Séparés des grains de quartz libre (par densité), ces derniers ont été alors soumis à une nouvelle analyse granulométrique (effectuée après traitement "JEFFRIES"). Celle-ci montre que ces micronodules sont composés en majeure partie d'argile ($\phi < 2\ \mu$, de 50 à 80 %), associée à un peu de limons et de sables fins). Leur teneur en kaolinite (déterminée par analyse thermogravimétrique) varie de 40 à 65 %, tandis que leur taux de Fe_2O_3 reste compris entre 4 et 8 %, selon les horizons et selon les dimensions de la fraction considérée.

Pour ce qui est des horizons B 2 et B 3, une simple comparaison nous éclaire sur la signification de ces données. Les teneurs en kaolinite et les taux de Fe_2O_3 des assemblages de diamètre compris entre 50 et 200 μ, obtenus par tamisage et séparés des grains de quartz par densité, à partir : soit de l'échantillon entier, soit de "sables" séparés après traitement à l'eau distillée, soit encore de ceux obtenus par la méthode "D. B. H_2O_2 electro" figurent dans le tableau 10-11.

Il ressort de l'examen de ces données que :

- les teneurs en kaolinite sont sensiblement identiques dans tous les cas ; on en déduit que ce minéral argileux se répartit de façon uniforme au sein des plasmas, et que la résistance des assemblages à l'action de l'eau est indépendante de son abondance.

Tableau 10-11

COMPOSITION DES ASSEMBLAGES, DE 50 à 200 µ DE DIAMETRE, EXTRAITS DU SOL ROUGE (Horizons B 2 et B 3)

Assemblages (⌀50 à 200 µ) extraits du sol rouge par :	Abondance (en % de l'échantillon)	Composition		Fe_2O_3/ Kaolinite
		Kaolinite	Fe_2O_3	
Tamisage du sol entier, puis séparation par densité	50	55	6,1	11,1
Tamisage du sol traité par l'"eau distillée"	23	57	6,3	11,1
Tamisage des "sables" "D. B H_2O_2 electro"	12	56	7,2	12,9

- les taux de Fe_2O_3 sont plus élevés dans les micronodules que dans l'ensemble du matériau (en valeur absolue et par rapport aux teneurs en kaolinite), ce qui semble indiquer que les substances ferrifères interviennent dans la résistance à la dispersion des micronodules.

Dans les horizons A, AB et B 1 (apexsol), il n'existe pas de relation directe entre les teneurs en Kaolinite et en oxy-hydroxyde de fer des micronodules, et celles des matériaux qui les englobent : à l'extrême, dans l'horizon A, des micronodules (remontés par la faune) constitués principalement de kaolinite et d'hydrates ferriques sont inclus dans un fond matriciel fait surtout de quartz.

Examinés en lame mince (en inclusion dans la résine), toutes ces "pseudoparticules" se présentent bien comme des micronodules, formés par un plasma rouge, abondant, faiblement anisotrope (ou même isotrope), incluant de petits grains de quartz, qui ne diffèrent pas fondamentalement de l'ensemble du matériau rouge typique.

Ces résultats confirment la continuité qui existe au sein du matériau rouge typique (des horizons B 3 et B 2) entre les assemblages résistants au traitement dispersant utilisé et l'ensemble des micronodules caractéristiques du sol rouge. Ce n'est que dans les horizons supérieurs (B 1, AB et A, formant l'apexsol) que tend à se développer une différence entre les

pseudoparticules (comparables à celle des horizons plus profonds) et l'ensemble du matériau (argileux, puis de plus en plus sableux).

b) Les assemblages non dissociés après traitement "TAMM", séparés de la même façon* à partir du sol de transition (et en moindre quantité à partir du sol rouge et du sol beige) ont été identifiés comme étant des fragments de nodules (formés lors de la préparation de l'échantillon par forçage à la main à travers un tamis à mailles de 2 mm).

Leurs analyses granulométriques, minéralogiques et chimiques révèlent que les teneurs en argile ($< 2\ \mu$), en kaolinite et en oxy-hydroxydes de fer en sont parfois très supérieures à celles du fond matriciel. Mélangés à des minéraux lourds et à des grains de quartz très fortement incrustés d'oxyde de fer, ils ne constituent pas des échantillons représentatifs ; aussi avons-nous préféré étudier les nodules séparés manuellement des matériaux dans lesquels ils sont inclus.

c) Etude des nodules séparés manuellement à partir des matériaux des horizons B 21, B 22 et B 3 du sol de transition et du sol beige.

Ils constituent des enclaves de matériau rouge, plus ou moins opacifiées sur leur pourtour et nuancées de brun ou d'ocre rouille en leur centre, incluses dans un fond matriciel beige.

Les analyses qui en sont faites permettent :

- de comparer ces enclaves au fond matriciel,
- d'étudier les variations verticales dans chacune de ces deux parties.

Nous avons étudié successivement :

- les compositions et plus particulièrement les teneurs en Fe_2O_3 et en kaolinite ainsi que les données granulométriques (obtenues après traitement JEFFRIES),
- l'aptitude à la mobilisation de l'argile (exprimée par un indice de mobilité égal au rapport du taux d'argile facilement dispersable au taux d'argile totale).

---

* Leur densité est un peu supérieure à celle des quartz, tandis que celle des micronodules était à peine inférieure.

α) Cas du sol de transition

1) Etude des compositions.

. Abondance des nodules et teneurs en Fe_2O_3.

Dans le tableau 10-12 sont reportés les poids respectifs des nodules et du fond matriciel (en % de l'échantillon total) ainsi que les teneurs en Fe_2O_3 (extrait par le traitement JEFFRIES).

Deux variations verticales se manifestent, de bas en haut, depuis la base de l'horizon B 3 jusqu'au sommet de l'horizon B 21 :

- forte diminution de l'abondance relative des nodules
- concentration croissante de Fe_2O_3 dans ces enclaves, au sein d'un fond matriciel de moins en moins riche en composés ferriques.

Tableau 10-12

ABONDANCE ET TENEURS EN Fe_2O_3 DES NODULES ET DU FOND MATRICIEL DANS LE SOL DE TRANSITION

Horizons	Profondeur	Répartitions % de l'échantillon		Fe_2O_3 % de la fraction	
		nodules %	fond matriciel %	nodules	fond matriciel
B 21	90 - 100 cm	17	83	10,5	2,5
	100 - 110 cm	37	63	7,4	2,6
B 22	120 - 130 cm	49	51	6,3	2,8
	160 - 170 cm	56	44	6,5	3,4
	190 - 200 cm	56	44	5,5	2,7
B 3	250 - 260 cm	58	42	6,5	2,8
	300 - 310 cm	86	14	4,9	3,1
	350 - 360 cm	86	14	-	-
	400 - 410 cm	86	14	-	-

. Teneurs en kaolinite.

Les valeurs obtenues par analyse thermogravimétrique des nodules et du fond matriciel figurent dans le tableau 10-13.

On constate que :

- celles relatives aux nodules ne varient que faiblement

Tableau 10-13

TENEURS EN KAOLINITE DES NODULES ET DU FOND MATRICIEL DU SOL DE TRANSITION

	KAOLINITE % (A. T. G.)	
	Nodules rouges	Fond matriciel beige
B 21 { 90 - 100 cm	41,2	36,9
B 21 { 100 - 110 cm	42,2	-
B 22 { 120 - 130 cm	43,8	39,4
B 22 { 190 - 200 cm	44,5	45,1
B 3 250 cm	45,1	46,7

de bas en haut (ou ne varient pas si on les rapporte aux matériaux déferrifiés),

- celles relatives au fond matriciel manifestent une nette décroissance de bas en haut (légèrement amplifiée si on les rapporte aux matériaux déferrifiés).

. Données granulométriques (obtenues après traitement déferrifiant "JEFFRIES" *)

Les taux d'argile ($\phi < 2\ \mu$) sont reportés dans le tableau 10-14.

Leurs variations verticales sont faibles en ce qui concerne le matériau nodulaire.

Elles sont beaucoup plus importantes au sein du fond matriciel.

Les distributions dimensionnelles des quartz (rapportées à 100 du total des quartz) sont regroupées dans le tableau 10-15.

Elles révèlent des variations verticales, de faible amplitude au sein du matériau nodulaire rouge, sensiblement plus importantes dans le fond matriciel.

---

* Le traitement n'a pas été dans ce cas répété un nombre de fois suffisant pour permettre la solubilisation des oxydes de fer incrustés dans les quartz.

Tableau 10-14

TENEURS EN ARGILE GRANULOMETRIQUE DES NODULES ET DU FOND MATRICIEL DU SOL DE TRANSITION (EXPRIMEES EN % DU MATERIAU DEFERRIFIE)

	ARGILE ($\phi < 2\ \mu$) % DANS LES MATERIAUX DEFERRIFIES.	
	Nodules rouges	Matrice beige
B 21 — 90 - 100 cm	59,4	47,5
B 21 — 100 - 110 cm	59,9	46,8
B 22 — 120 - 130 cm	61,3	52,0
B 22 — 160 - 170 cm	59,6	54,5
B 22 — 190 - 200 cm	60,9	56,2
B 3 — 250 - 260 cm	61,2	62,4
B 3 — 300 - 310 cm	59,0	61,6
B 3 — 350 - 360 cm	60,9	60,4
B 3 — 400 - 410 cm	60,4	59,2

Tableau 10-15

GRANULOMETRIES DES QUARTZ DANS LES NODULES ET DANS LE FOND MATRICIEL DU SOL DE TRANSITION

	Distribution dimensionnelle des quartz (% du total des quartz)							
	Nodules rouges				Fond matriciel beige			
	(2-20µ)	20 - 50 µ	50 - 200 µ	200 - 2000 µ	2-20µ	20 - 50 µ	50 - 200 µ	200 - 2000 µ
B 21								
90 - 100 cm	12,0	18,2	34,6	35,9	13,6	15,7	28,0	42,7
100 - 110 cm	12,8	19,9	34,0	33,3	13,6	16,4	27,4	42,6
B 22								
200 - 210 cm	9,4	21,3	35,9	33,4	15,5	23,7	30,8	30,0

. L'étude comparée des compositions chimique, minéralogique et granulométrique des nodules et du fond matriciel nous conduit à constater que :

- les nodules s'enrichissent en Fe_2O_3, de façon absolue, de bas en haut, tandis que le fond matriciel manifeste une tendance inverse,
- les nodules sont caractérisés par des variations verticales faibles et progressives de l'abondance et de la distribution dimensionnelle des autres constituants :
  - . appauvrissement relatif en kaolinite (dû à l'enrichissement en oxy-hydrates de fer)
  - . modification peu importante de la granulométrie des quartz
- ils s'opposent en cela au fond matriciel, progressivement appauvri, de façon absolue, en kaolinite, et caractérisé par des variations importantes de la granulométrie des quartz.

Il est logique d'attribuer ces distributions différentes à des aptitudes inégales des constituants à être déplacés.

2) Etude de l'aptitude à la mobilisation de l'argile.

Elle a été appréciée en utilisant les méthodes d'analyse granulométrique sélective précédemment exposées :

- "D.B. H_2O_2 electro" = argile "libre",
- "TAMM", dispersant, en plus, l'argile incluse dans les micronodules,
- "JEFFRIES" capable de dissocier également l'argile retenue par des ciments ferriques.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 10-16, où figure également un indice de mobilité, correspondant au rapport du taux d'argile "libre" au taux d'argile totale.

Tableau 10-16

TAUX D'ARGILE DISPERSEE PAR DIFFERENTES METHODES A PARTIR DES NODULES ET DU FOND MATRICIEL.

HORIZONS PROFONDEUR		NODULES ROUGES				FOND MATRICIEL BEIGE			
		ARGILE % de l'échantillon			INDICE DE MOBILITE	ARGILE % de l'échantillon			INDICE DE MOBILITE
		D. B. H_2O_2 electro (1)	"TAMM" (2)	"JEFFRIES" (3)	(1/3)	D. B. H_2O_2 electro (1)	"TAMM" (2)	"JEFFRIES" (3)	(1/3)
B 21	90 - 100 cm	8,4	8,8	49,1	17	46,4	46,6	46,9	99
	100 - 110 cm	9,0	-	54,1	17	43,0	-	44,3	97
B 22	120 - 130 cm	9,3	-	54,1	17	43,0	-	48,6	88
	160 - 170 cm	8,3	15,0	52,2	16	38,3	45,2	49,7	77
	190 - 200 cm	7,1	-	54,3	13	41,8	-	52,8	77
B 3	250 - 260 cm	20,2	-	55,0	37	45,7	-	57,8	79
	300 - 310 cm	22,5	41,3	53,4	42	38,8	46,8	57,0	68
	350 - 360 cm	22,7	-	51,3	44	41,0	-	55,1	80
	400 - 410 cm	19,1	38,2	51,0	37	42,1	48,4	52,2	80

Il apparaît sur ce tableau que :

- les taux d'argile "libre" sont faibles et décroissants de bas en haut dans les nodules, mais sont beaucoup plus élevés dans le fond matriciel. Ils s'accordent donc avec les appréciations de texture faites sur le terrain (nodules à dominance sableuse après écrasement, inclus dans un fond matriciel argileux) ;

- le traitement "TAMM" n'augmente fortement la quantité d'argile dispersée que dans les nodules et dans le fond matriciel des horizons profonds (dans lesquels se reconnaissent au microscope des micronodules) ;

- le traitement "JEFFRIES" accroît très fortement les proportions d'argile dispersée à partir des nodules des horizons B 22 et B 21 dont les teneurs dépassent alors celles du fond matriciel ; on en déduit que la plus grande partie de l'argile contenue dans ces nodules était englobée dans les ciments ferriques solubilisés par la méthode employée ;

- l'indice de mobilité de l'argile est faible dans les nodules et diminue de bas en haut, il est à l'inverse élevé dans le fond matriciel et croissant de bas en haut ; il ne permet pas toutefois de faire la part des deux formes d'immobilisation qui ont été, ici, mises en évidence :

  - argile "bloquée" sous forme de micronodules vulnérables au traitement "TAMM",
  - argile "cimentée" par les hydrates ferriques et seulement libérée après déferrification "JEFFRIES",

la première est surtout représentée dans les nodules des horizons profonds et dans le fond matriciel, son abondance diminue de bas en haut, sa présence n'est marquée par aucune concentration importante de Fe_2O_3 ;
à l'inverse, la seconde devient progressivement dominante dans les nodules à partir de l'horizon B 2, ces derniers étant caractérisés par des teneurs croissantes en Fe_2O_3.

Interprétation :

Ces données font apparaître le contraste croissant, de bas en haut, entre 2 phases distinctes, qui s'interpénètrent dans cette partie du profil de sol de transition et qui sont, chacune, marquées par des variations en sens

inverse (fig.10-4) :

- imprégnation de plus en plus forte par les oxy-hydroxydes de fer, blocage, puis cimentation de l'argile et maintien des constituants dans les nodules qui "s'enkystent" (à mesure que leur volume se réduit),
- diminution de la teneur en fer, accroissement relatif de la mobilité et appauvrissement en argile dans la matrice beige, de plus en plus représentée vers le haut (puis exclusive dans l'apexsol).

Cette disposition est comparable à celle observée dans les ferri-argilanes zonés (cf. fig. 10-5) dont la périphérie, imprégnée et cimentée par les oxy-hydroxydes de fer se transforme en "ferranes", tandis que la partie centrale, au contact du vide, progressivement décolorée, donne lieu à un départ d'argile (manifesté par des discordances). Comme dans le cas des ferri-argilanes, il semble que cette disposition soit une conséquence des phénomènes de ségrégation des oxy-hydroxydes de fer et de la kaolinite, manifestés cette fois à l'échelle macroscopique.

b) Cas du sol beige.

- Les nodules sont ici moins abondants (5 à 10 %) et surtout représentés dans l'horizon.B 21 ; ils sont opacifiés, entourés d'un cortex qui leur donne la morphologie de concrétions, et comme "enkystés" dans un plasma décoloré dont ils apparaissent totalement distincts.

- Leur teneur en Fe_2O_3 atteint 15 % (tandis qu'elle est seulement de 3 % dans le fond matriciel) ; une partie de ce fer se trouve sous forme d'incrustations dans les fissures de quartz fortement fragmentés, très finement divisés après solubilisation des ciments ferriques par le traitement "JEFFRIES".

- A cet enrichissement absolu en Fe_2O_3, correspondent des teneurs relativement faibles en kaolinite (35 %).

Ces "concrétions" apparaissent en fait dérivées des nodules individualisés et enrichis en fer du sol de transition. Bien qu'étant très différentes du fond matriciel par leur composition, et apparemment en discontinuité avec lui, elles présentent des variations continues et ordonnées dans l'es-

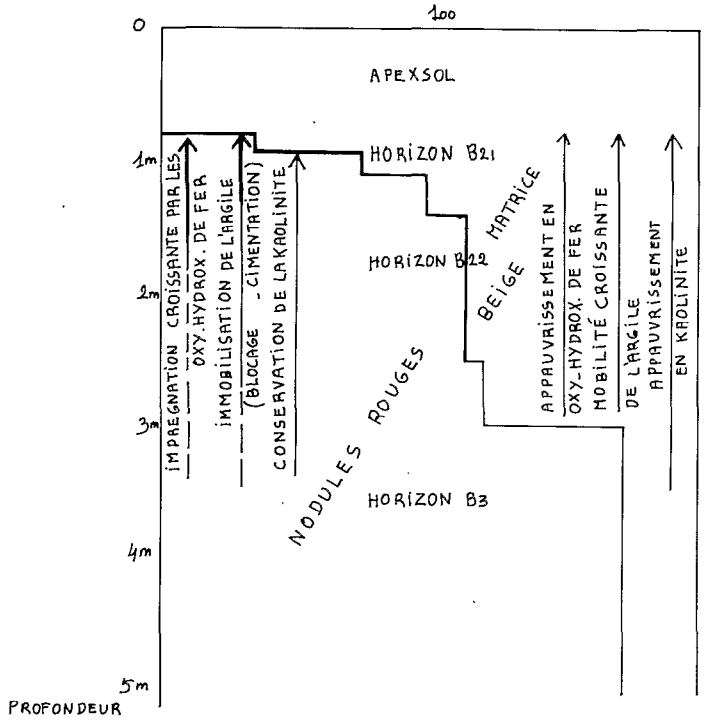


Fig. 10-4 - Variations verticales décelées par l'analyse des nodules rouges et de la matrice beige séparés à la main dans le sol de transition.

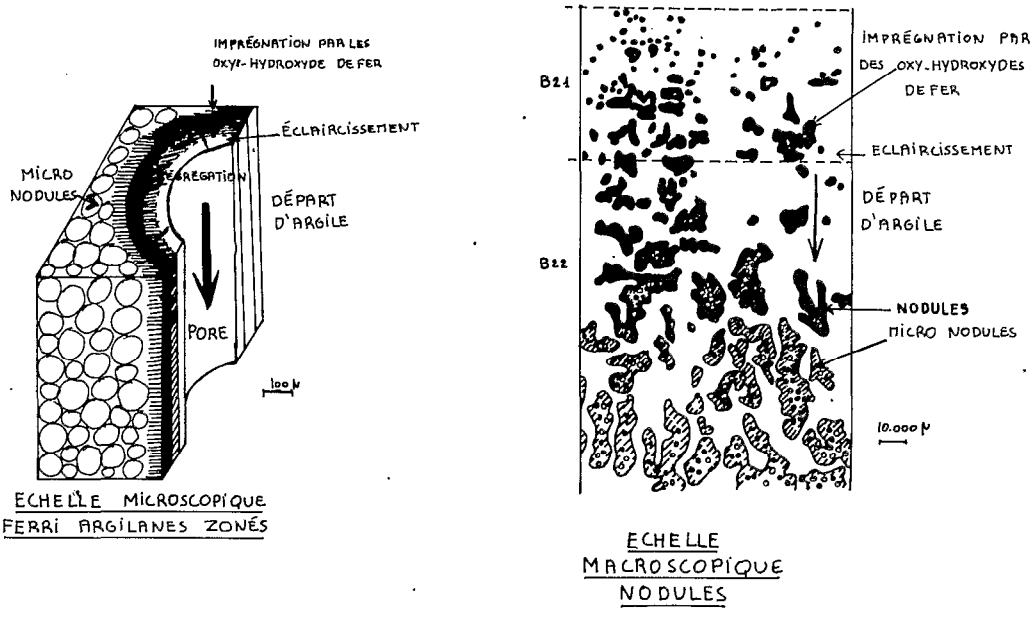


Fig. 10-5 - Ségrégation des oxyhydrates de fer et de la kaolinite dans les ferri-argilanes et dans le sol de transition.

pace et correspondent ici au terme extrême de l'évolution glébulaire (cf. chapitre 9). On en déduit qu'elles sont formées en place, par ségrégation du fer et de la kaolinite, au sein d'un matériau de plus en plus décoloré et globalement appauvri en fer.

CONCLUSIONS -

Deux stades dans l'évolution de l'organisation ont été mis en évidence dans les séquences de sols étudiées :

- Le premier, très discret, manifesté à l'échelle des micronodules, faiblement enrichis en oxy-hydrates de fer par rapport à l'argile libre (représentée par les argilanes rouges et par les liserés d'argile orientée) sans écarts ni discontinuités importantes. Le blocage qui en résulte ne résiste pas à une action ménagée, telle que celle du réactif de TAMM à l'obscurité. Ce stade est caractéristique des matériaux rouges typiques.

- Le deuxième très apparent au niveau des ferri-argilanes zonés et des nodules ; il aboutit : d'un côté à une cimentation, une incrustation et un enkystement par les oxy-hydrates de fer qui cimentent fortement et de façon difficilement réversible, les constituants des nodules ; de l'autre côté à une décoloration, une déferrification et une mobilisation relative de l'argile contenue dans un fond matriciel de plus en plus dominant. Cette évolution caractérise certains sols rouges cultivés, le sol de transition et le sol beige.

Des modifications en sens inverse caractérisent donc l'argile "libre" et celle incluse dans les glébules (micronodules dominants dans le sol rouge, puis nodules et concrétions limités à une partie de plus en plus restreinte du volume dans le sol de transition et dans les sols beiges) (tableau 10-17).

Toute l'évolution des assemblages plasmiques se passe donc entre 3 états, qui déterminent l'organisation ou les changements d'organisation dans les différents sols :

- argile immobilisée (micronodules) libérée par le traitement "TAMM",

Tableau 10-17

VARIATIONS AFFECTANT L'ARGILE LIBRE ET LE MATERIAU INCLUS DANS LES GLEBULES

		SOLS			APTITUDE A LA MOBILISATION DE L'ARGILE
		ROUGE	DE TRANSITION	BEIGE	
Fe_2O_3 % de la fraction	Argile "libre"	8,5	5,1	3	croissante
	Glébules	7,2	10,5	15	Immobilisation puis cimentation
Organisation Micro	Argile libre	argilanes rouges lisérés orientés et micronodules	fond matriciel clair ferri-argilanes zonés nodules	fond matriciel décoloré concrétions	

- argile cimentée (nodules et concrétions) libérée par le traitement "JEFFRIES",
- argile libre (argilanes et fond matriciel) dispersée par le traitement "D. B. H_2O_2 electro".

Ces états semblent être liés aux relations fer-argile, qui exercent une action dominante sur l'association des constituants secondaires.

Deux possibilités d'évolution s'offrent ainsi pour l'argile immobilisée dans les micronodules de sol rouge :

- La première porte seulement atteinte aux liaisons assurées par les très faibles quantités de fer retenues à la surface des particules (extraites par le réactif de TAMM). Elle libère de l'argile avec la plus grande partie du fer qui lui est associé. Dépendante des variations des conditions physiques et physico-chimiques, cette dissociation serait à l'origine des redistributions de constituants du plasma observées dans le sol rouge. Cette évolution semble être plus ou moins réversible (une partie de l'argile étant réincorporée à la structure micronodulaire (tableau 10-18 A) ;
- La seconde fait intervenir une ségrégation localisée du fer et de la kaolinite qui a pour effet, non seulement de libérer l'argile mais de disjoindre ses constituants : kaolinite et substances ferrifères. Ces dernières sont alors concentrées dans les nodules (et dans les fissures du quartz) ou elles interviennent comme "ciments", sous des formes indépendantes (tableau 10-18 B).

Tableau 10-18

EVOLUTION DE L'ARGILE IMMOBILISEE DANS LES MICRONODULES

A - ARGILE IMMOBILISEE (Micronodules) → DISSOCIATION → ARGILE LIBRE
← liaisons assurées par de très petites quantités de fer

B - ARGILE IMMOBILISEE (Micronodules) → SEGREGATIONS LOCALISEES Fer - Kaolinite → ARGILE LIBRE (- Fe_2O_3)
→ ARGILE CIMENTEE (+ Fe_2O_3 indépendant) Nodules et concrétions

B - UTILISATION DE DIFFERENTS TESTS, ET EN PARTICULIER DE LA METHODE D' "ANALYSE D'AGREGATS", A L'ETUDE DE LA STABILITE PHYSIQUE ET DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ASSEMBLAGES.

Après avoir mis en évidence les différents types d'agglomérats caractéristiques des sols étudiés, nous nous proposons d'apprécier leur stabilité physique et leurs caractéristiques mécaniques à l'aide de tests.

Nous examinerons successivement les résultats fournis par :

- les tests de cohésion (à l'état sec et à l'état humide)
- la méthode d' "analyse d'agrégats"
- l'appréciation du retrait (et du gonflement)
- les essais de compactage.

1/ - Tests de cohésion.

a) Méthode

Ils sont effectués sur des agrégats de formes irrégulières, se présentant sous l'aspect d'une association plus ou moins hétérogène d'assemblages élémentaires.

Dans ces conditions, la cohésion ne peut être appréciée que par un test, tel celui utilisé par HENIN et CONCARET (1965) portant sur la résistance des assemblages à l'écrasement. La méthode consiste à comprimer l'agrégat entre une buttée et le plateau d'une balance, ce qui permet de suivre l'effort appliqué à la particule jusqu'au moment où les premières ruptures apparaissent. On note alors la lecture correspondant à la valeur la plus élevée atteinte avant la rupture.

Nous avons opéré sur des ensembles d'agrégats de dimensions comparables ($\varnothing$ entre 1 et 2 mm) obtenus en forçant la terre sèche à travers un tamis à mailles carrées. Les mesures faites intéressent 3 échantillons représentatifs des sols étudiés :

- horizon B 2 de sol rouge, micronodulaire
- horizon B 1 de sol beige, constitué principalement de grains de squelette et d'argile "libre"

- nodules extraits de l'horizon B 2 du sol de transition.

Pour chaque ensemble, les mesures ont été répétées sur une centaine d'agrégats, les uns à l'état sec, les autres humectés sous vide et par capillarité (de façon à éviter leur dislocation).

b) Observations réalisées lors de la manipulation.

α) A l'état sec.

- Les agrégats de sol rouge résistent d'abord (ce qui témoigne de la continuité de la structure micronodulaire) puis s'effondrent brusquement et se réduisent en une poudre (constituée de micronodules) ;

- Les agrégats de sol beige supportent des contraintes plus importantes et se brisent ensuite en quelques fragments ;

- Les assemblages issus des nodules ne sont généralement pas disloqués par les efforts qui leur sont appliqués.

β) A l'état humide.

- Presque tous les agrégats de sol rouge transmettent intégralement au plateau de la balance le mouvement de la buttée au début du test. La rupture apparaît pour des efforts compris entre 1 et 15 grammes. Elle se traduit par un écrasement qui semble être d'autant plus brutal que le seuil de rupture se situe à un niveau plus élevé : il se produit alors une dislocation complète de l'agrégat en micronodules. A l'inverse, lorsque les premières fissures, dont l'apparition coïncide avec un léger décrochement de la balance, se produisent pour des valeurs de l'ordre de 1 gramme, le comportement des agrégats sous une contrainte croissante manifeste ensuite une nette tendance à la plasticité.

- Les agrégats de sol beige se déforment dès le début de la contrainte et ne transmettent pas intégralement au plateau de la balance le mouvement de la butée, de telle sorte qu'il n'est pas possible d'enregistrer avec précision un seuil de rupture. Un accroissement de la contrainte provoque l'aplatissement progressif de l'agrégat et révèle ainsi sa plasticité.

- Les assemblages issus des nodules ont sensiblement le même comportement qu'à l'état sec.

c) Résultats.

Les valeurs médianes de la résistance à l'écrasement des agrégats (secs ou humectés) (exprimée, pour chaque agrégat, en grammes) sont regroupées dans le tableau 10-19.

Tableau 10-19.

VALEURS MEDIANES DE LA RESISTANCE A L'ECRASEMENT DES AGREGATS (EXPRIMEE, POUR CHAQUE AGREGAT, EN GRAMMES).

	Valeurs médianes de la RESISTANCE A L'ECRASEMENT.	
	Etat sec	Après humectation
SOL ROUGE (horizon B 2)	35	11
	$\wedge$	$\vee$
SOL BEIGE (horizon B 1)	75	aucun seuil de rupture
NODULES (extrait de l'horizon B 2 du sol de transition	>100	>100

d) Interprétation - conclusions.

Nous constatons que l'humectation a eu pour effet d'intervertir l'ordre de résistance à l'écrasement des agrégats provenant des sols rouge et beige :

- les premiers manifestent une certaine rigidité et, pour la très grande majorité d'entre eux, la première réaction à la contrainte est une rupture sans déformation qui ne se produit que par application d'un effort relativement élevé. C'est là un comportement proche de celui de grains de sables plus ou moins fragiles ;
- les seconds, dont la cohésion était forte à l'état sec, sont devenus plastiques et se déforment sous la moindre contrainte, manifestant par leur plasticité la nature argileuse de leur ciment.

La rigidité et la résistance à l'écrasement des assemblages nodulaires (extraits du sol de transition) pratiquement indépendante du degré

d'humidité, révèle un début de cimentation.

2/ - "Analyse d'agrégats"

a) Méthode

La méthode utilisée a été proposée par HENIN et MONNIER (1956).

Elle consiste à extraire d'un ensemble d'agglomérats qui constituent l'échantillon ceux d'entre eux qui, en tout ou partie, manifestent une résistance suffisante aux traitements qui leur sont appliqués.

A la suite de l'action de l'eau sur les agrégats, intervenant soit directement, soit après imbibition par de l'alcool éthylique* ou par du benzène**, les agglomérats sont séparés par un tamisage sous l'eau effectué dans des conditions conventionnelles ($\phi > 200\,\mu$). On obtient ainsi 3 taux d'agrégats stables.

Ces données ne rendent cependant compte, ni du devenir des agrégats disloqués par l'action de l'eau, ni de la présence d'unités structurales dont les dimensions sont de l'ordre de la centaine de microns (tels les micronodules reconnus par l'observation microscopique). Il est donc nécessaire de caractériser également la fraction passée à travers les mailles du tamis, en déterminant la quantité d'éléments fins dispersés au cours de la manipulation.

Pour cela, selon la technique proposée, le filtrat est transvasé dans une allonge de sédimentation ; le volume est amené à 1000 cc ; on homogénéise pendant 15 secondes la suspension par retournements (après adjonction d'une faible dose de dispersant : NH_4OH, pour éviter la floculation et on détermine par la méthode "pipette de Robinson", le taux de particules de diamètre inférieur à 20 μ.

---

* L'imbibition préalable par de l'alcool éthylique est destinée à atténuer l'action ultérieure de l'eau et à renforcer l'influence du facteur : cohésion à l'état humide.

** Le benzène, agissant à la manière d'un piston incompressible dans les volumes poreux, aggrave l'effet du traitement ultérieur par l'eau qu'il rend plus dépendant du facteur : mouillabilité.

b) Résultats et interprétation

Les résultats relatifs à 4 profils de la toposéquence sont figurés graphiquement :

- sur la figure 10-6 , les taux d' "agrégats grossiers stables" restés sur le tamis à l'issue des différentes opérations, auxquels on a retranché les teneurs en sables grossiers quartzeux ($\varnothing > 200\ \mu$),
- sur la figure 10-7 , les taux de (A + L) obtenus avec et sans prétraitement benzène,
- sur la figure 10-8 , les rapports des taux de (A + L) les plus faibles (eau) aux plus élevés (benzène).

Plusieurs ensembles de constatations ressortent de l'examen de ces graphiques.

1) Les horizons A et AB (compris approximativement entre 0 et 40 cm) sont caractérisés par :

- des taux d'agrégats grossiers "eau" et "alcool" faibles.
- des taux d'agrégats "benzène" légèrement supérieurs à ceux des horizons plus profonds.
- des taux de (A + L) relativement faibles, du même ordre de grandeur que (A + L) granulométrique après prétraitement au benzène, mais sensiblement inférieurs après la seule action directe de l'eau, sauf dans le cas du sol beige où l'écart est nul dans l'horizon AB et faible dans l'horizon A (fig. 10-7).
- des rapports "(A + L) eau" /"(A + L) benzène", faibles et décroissants de haut en bas dans les sols rouges, plus élevés et croissants de haut en bas dans le sol de transition, très élevés et croissants de haut en bas dans le sol beige.

Ceci signifie que :

- ces horizons superficiels, sableux à sablo-argileux, contiennent peu d'éléments structuraux grossiers résistants à l'action directe de l'eau,
- la présence de matière organique y est responsable

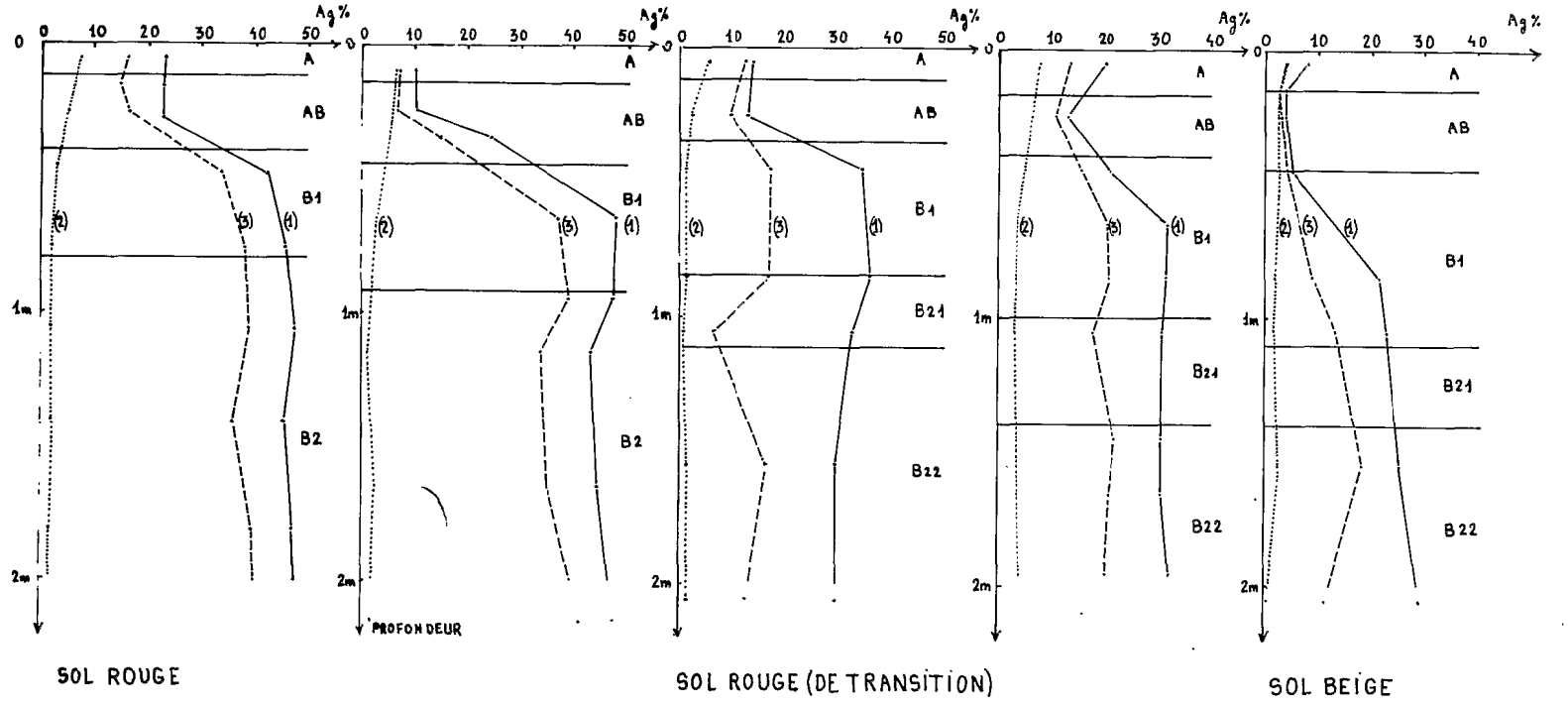


Fig. 10-6 - Taux d'agrégats grossiers stable.

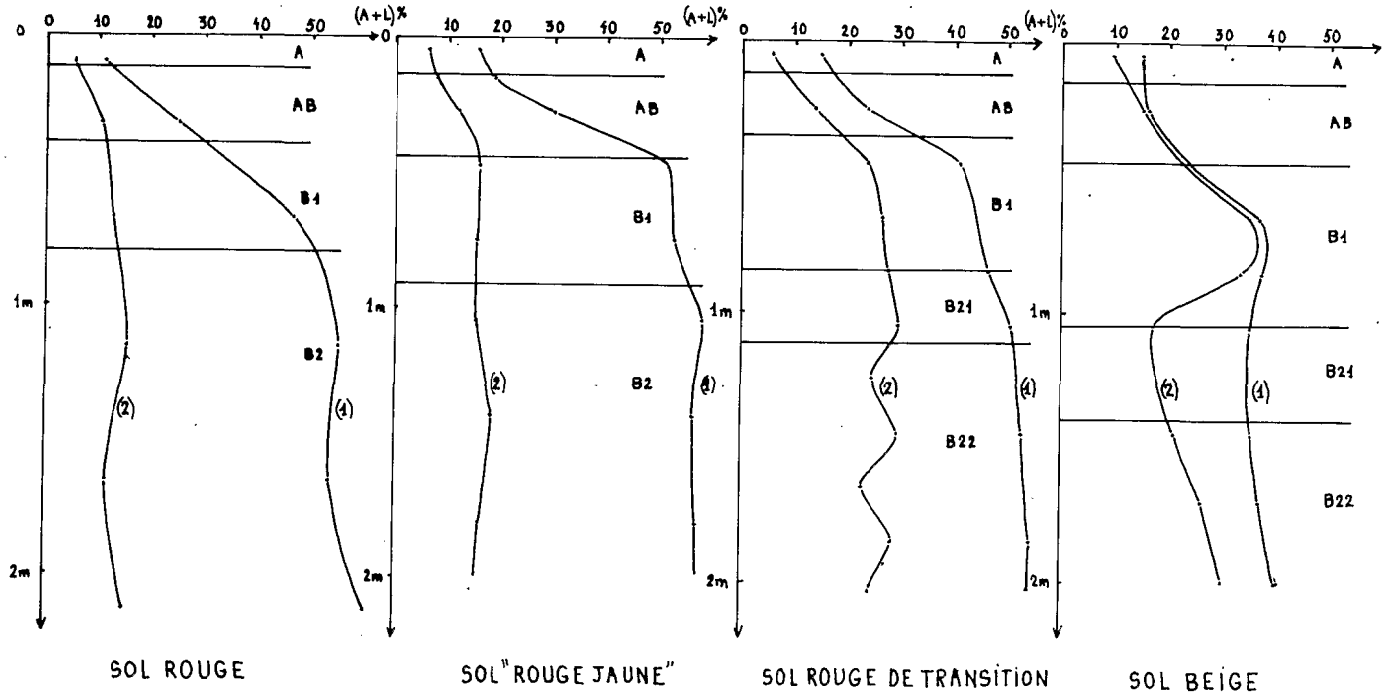


Fig. 10-7 - Taux de (A + L) obtenus avec et sans prétraitement benzène.

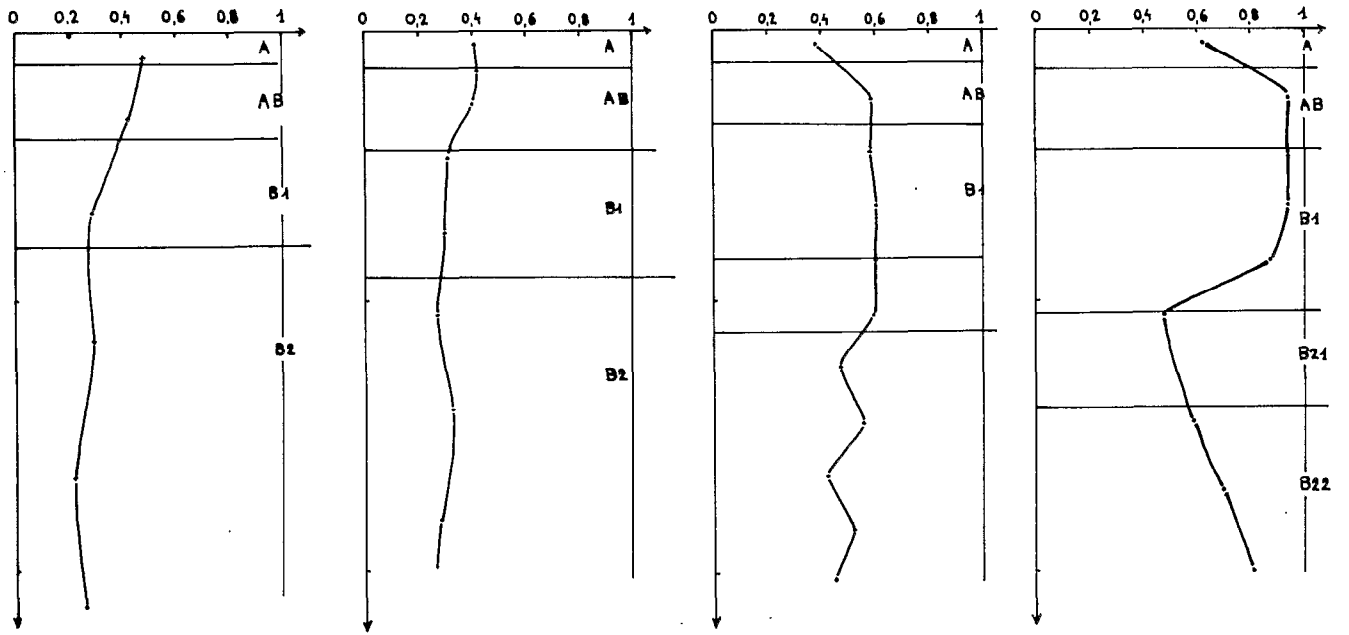


Fig. 10-8 - Rapport des taux de (A + L) les plus faibles (eau) aux plus élevés (benzène).

d'une légère diminution de la mouillabilité,

- une fraction des éléments fins ($\varnothing < 20\,\mu$) s'y trouve incluse dans de petits agglomérats, résistants à l'action directe de l'eau mais dissociés après humectation par le benzène ; cette fraction (représentée par l'écart entre les 2 valeurs de (A + L) est élevée dans le sol rouge, moindre dans le sol de transition, faible et limitée à l'horizon A dans le sol beige.
- Il résulte de la présence de ces agglomérats que la proportion d'éléments fins ($\varnothing < 20\,\mu$) susceptibles d'être dissociés par la seule action de l'eau est, faible et décroissante de haut en bas dans le sol rouge, plus importante à très élevée et croissante de haut en bas dans le sol de transition et le sol beige (fig. 10-8).

Une certaine convergence se manifeste donc au niveau des horizons A et AB de tous les sols de la toposéquence. Elle correspond au développement d'une texture sableuse dans la partie superficielle des profils étudiés. Les différences portent essentiellement sur la proportion d'éléments fins inclus dans de petits agglomérats résistants à l'action directe de l'eau, dominants dans les sols rouges mais de moins en moins représentés dans le sol de transition et dans les sols beiges. Ces agglomérats semblent correspondre ici aux micronodules dispersés dans le fond matriciel ou remontés par la faune, mis en évidence par l'observation microscopique (cf. chap. 9). Leur présence peut être mise en relation avec la couleur et avec la consistance de ces horizons (d'autant plus rouge et friable que ces assemblages sont plus abondants).

2) Les horizons B 1 sont caractérisés par :

- des taux d'agrégats grossiers résistants à l'eau plus élevés dans le sol rouge que dans le sol de transition et dans le sol beige.
- un effet protecteur du prétraitement alcool plus marqué dans le sol de transition que dans les sols rouges et beiges.
- des taux d'"agrégats benzène" toujours faibles, à peine

augmentés dans les sols beiges.

- des taux de "(A + L) eau" croissants depuis le sol rouge jusqu'au sol de transition et au sol beige (tandis que "(A + L) benzène" reste proche de (A + L) granulométrique), entraînant l'augmentation des rapports "(A + L) eau"/(A + L) benzène (respectivement 0, 3 - 0, 6 et 0, 95).

On déduit de ces données que :

- si les agrégats grossiers sont dans l'ensemble stables dans le sol rouge, une fraction importante de ceux contenus dans le sol de transition présente une résistance inférieure au seuil correspondant au traitement "eau" (l'effet protecteur du prétraitement alcool étant alors maximum), tandis que la plupart sont instables dans le sol beige.
- la vulnérabilité au prétraitement benzène révèle à la fois la mouillabilité de l'ensemble des matériaux, et l'absence presque totale d'agrégats grossiers présentant une cohésion, à l'état humide, suffisante pour résister à la pression transmise au benzène par les ménisques.
- la proportion des éléments fins susceptibles d'être dissociés par l'action de l'eau est faible dans le sol rouge (30 %), plus élevée dans le sol de transition (60 %), très largement dominante dans les sols beiges (95 %).

Il apparaît que c'est au niveau de cet horizon (B 1) que la méthode utilisée révèle les différences les plus nettes entre les sols étudiés ; elle met ainsi en évidence :

- d'une part, semble-t-il, le franchissement d'un seuil de résistance des agrégats grossiers à l'action de l'eau (au niveau du sol de transition),
- d'autre part une variation progressive de la proportion d'éléments fins facilement dissociés par l'eau (minimale dans le sol rouge, très forte dans le beige).

3) Au niveau des horizons B 2 (1 et 2)

- les taux d'agrégats grossiers "eau" et "alcool" diffèrent peu les uns des autres dans le sol rouge, présentent un écart important dans le sol de transition (minimum de "Ag. eau" dans l'horizon B 21) et sont faibles dans le sol beige.
- les taux d'agrégats grossiers "benzène" sont toujours faibles.
- les taux de "(A + L) eau" tendent là encore à augmenter en allant des sols rouges aux sols beiges ; ils présentent plusieurs variations verticales au niveau du sol de transition et un seul minimum dans l'horizon B 21 du sol beige.
- les taux de "(A + L) benzène" sont peu différents de (A + L) granulométrique.

Ces données révèlent :

- la stabilité élevée des agrégats grossiers issus du matériau rouge micronodulaire
- la vulnérabilité plus grande à l'action de l'eau manifestée dans le sol de transition au niveau de l'horizon B 21 (où s'individualisent les nodules)
- l'absence d'assemblage présentant une cohésion suffisante à l'état humide pour résister à l'action de l'eau après humectation par le benzène (même les nodules et les concrétions sont donc ici relativement fragiles)
- les variations verticales de la proportion d'éléments fins ($\varnothing < 20\ \mu$) susceptibles d'être dissociés par la seule action de l'eau, multiples dans le sol de transition (en relation avec la nodulation et la disjonction fer-argile), plus simples et caractérisées par un seul minimum au niveau de l'horizon B 21 du sol beige (où la densité de concrétions est la plus forte).

Nous constatons que les résultats de l'analyse d'agrégat sont ici encore liés aux caractéristiques microstructurales (cf. chap. 9) :

- le matériau rouge correspondant à la structure micronodulaire continue est ainsi caractérisé par la dominance des agrégats résistants à l'action de l'eau et par la faible proportion d'éléments fins ($\phi < 20\ \mu$) dissociés ;

- les matériaux du sol de transition et du sol beige où s'individualisent puis s'enkystent les nodules, ne contiennent, à l'inverse, qu'une petite fraction d'agrégats grossiers stables (10 à 20 %), la proportion des éléments fins dispersés au cours du traitement par l'eau y devient prépondérante.

c) Observation des agrégats isolés et des particules en suspension.

Son but est de préciser la signification des résultats de l'analyse d'agrégats.

L'examen à la loupe binoculaire des agrégats grossiers restés sur le tamis après traitement à l'eau révèle que :

- ceux issus du sol rouge correspondent, en fait, pour la plupart à des fragments* de la structure micronodulaire que rien ne distingue de l'ensemble des agrégats soumis au test ; il n'y a donc, entre eux et les autres assemblages passés à travers les mailles du tamis qu'une différence de dimension ou de résistance relative à l'action de l'eau ;
- ceux extraits du sol de transition et du sol beige présentent, à l'inverse, une morphologie autre que celle du sol entier : il s'agit de fragments* de nodules rouge sombre, extraits sélectivement par le traitement à l'eau (leur composition chimique et minéralogique est, par ailleurs, différente de celle de l'échantillon total).

---

* Le premier stade de la fragmentation est réalisé, lors de la préparation de l'échantillon, par forçage à la main à travers un tamis ($\varnothing$ = 2 mm).

Ce résultat est conforme aux indications fournies par l'observation microscopique (cf. fig. 9-1) et par l'étude analytique comparée des nodules et du fond matriciel (cf. chap. 10 § A - II - c) qui révèlent l'individualisation croissante des nodules, à partir du sol de transition jusqu'au sol beige.

L'aspect des suspensions préparées dans les allonges de sédimentation est également significatif de l'état d'association des constituants :

- la plupart des particules fines ($\phi < 20\ \mu$) provenant du sol rouge sédimentent dans l'eau à la manière de limons ; il s'agit, non pas d'argile dispersée, mais de très fins assemblages qui résultent de la pulvérisation des micronodules, renforcée après humectation par le benzène.
- les suspensions préparées à partir du sol beige ont un tout autre aspect, qui révèle qu'elles sont constituées principalement de particules argileuses dispersées dans l'eau ; l'effet du prétraitement benzène sur le taux de (A + L) est, dans ce cas, limité ou nul (fig. 10-7 et 10-8).

Il apparaît ainsi que, si dans le sol rouge une fraction importante des cristallites de kaolinite est maintenue associée, même après que le matériau ait été très finement divisé ; dans le sol beige à l'inverse, les particules argileuses tendent à se dissocier les unes des autres et à se disperser dans l'eau.

d) Signification de l'abondance et de l'état des particules fines ($\phi < 20\ \mu$) mises en suspension dans l'eau, en rapport avec les données morphologiques.

Il est remarquable que la différence de comportement manifestée à l'échelle des agglomérats terreux grossiers ($\phi > 200\ \mu$) restés sur le tamis, apparaisse également au niveau des assemblages beaucoup plus fins ($\phi < 20\ \mu$) passés au travers des mailles.

On note cependant que la variation verticale du caractère ainsi mis en évidence n'est pas identique à celle du taux d'agrégats grossiers : dans le profil de sol rouge en particulier, sa décroissance progressive, de bas en haut, (de l'horizon B 2 à la surface) est en meilleure relation avec les caractères morphologiques des horizons correspondants qui ne sont séparés que par des transitions diffuses. L'observation microscopique y décèle le passage d'un assemblage de micronodules anastomosés (se comportant

comme des agrégats grossiers) à un autre fait de micronodules libres ou ennoyés dans le fond matriciel (susceptible de passer dans les mailles du tamis).

Dans ce cas (assez fréquent semble-t-il dans les sols ferrallitiques), la détermination de (A + L) rend mieux compte que ne le fait le taux d'agrégats grossiers, de la variation verticale de la fraction agrégée (souvent très fine) résistante à l'action de l'eau.

Il apparaît ainsi que ce n'est pas seulement à l'échelle des agrégats grossiers que se manifeste ici la stabilité de la structure, mais bien plutôt à celle d'assemblages beaucoup plus petits qui ne doivent leur résistance qu'à l'état d'association des particules argileuses et aux forces de liaison qui les unissent.

e) Conclusions.

Les tests de stabilité, appliqués aux échantillons des sols de la toposéquence, mettent ici en évidence des caractéristiques bien différentes :

- Celles des matériaux rouges* :
  - . moyennement cohérents à l'état humide (aussi bien qu'à l'état sec),
  - . résistants à l'action directe de l'eau, mais éclatés lorsque la brutalité de cette action est renforcée par l'effet du prétraitement benzène,
  - . se maintenant dans l'eau (additionnée de NH_4OH) sous forme de particules complexes grossières (après tamisage dans l'eau) ou très fines (dans le cas du prétraitement benzène).
- Celles des matériaux beige * :
  - . très peu cohérents à l'état humide (bien que très cohérent à l'état sec),
  - . peu résistants à l'action directe de l'eau (qui en désagrège la plus grande partie),

---

* On remarque que ces différences sont ici liées à la couleur des matériaux et donc à l'état physico-chimique et/ou à la distribution des formes du fer associées à la kaolinite.

. tendant à se dissocier dans l'eau (additionnée de NH_4OH par diffraction de la fraction argileuse.

Le comportement aberrant est ici celui des matériaux rouges plus proche de celui de grains de sables plus ou moins fragiles que de celui d'un matériau composé en grande partie par de l'argile.

x
x x

Il est nécessaire d'élucider ici la cause de ce comportement particulier.

Selon la théorie de HENIN (1938), le gonflement (précédant la dispersion) intervient dans la stabilité de la structure par l'intermédiaire de la cohésion du sol à l'état humide, qu'il tend à diminuer.

Dans ces conditions, il apparaîtrait suffisant de définir la stabilité des agrégats de sol rouge par la seule valeur de leur cohésion à l'état humide. Or nous savons que celle-ci n'est pas très élevée. Mais il faut noter que le degré de gonflement (et de dispersion) dépend de nombreux facteurs. Il varie avec l'humidité et avec la concentration ionique de la solution du sol. Il peut également être influencé par des actions mécaniques. De plus, il correspond à un état d'équilibre avec le milieu, parfois lent à s'établir. L'état de gonflement à l'intérieur d'un sol est donc en perpétuelle évolution, et ceci plus particulièrement sous des climats caractérisés par l'alternance des saisons sèches et humides.

Dépendante de la dispersion, la cohésion des agrégats peut varier, elle aussi, en fonction des caractéristiques physico-chimiques du milieu. HENIN et CONCARET (1965) ont ainsi montré que la seule présence de Cl_2Mg ou de Cl Na à faible concentration pouvait abaisser la résistance à l'écrasement d'un matériau de 5 à 5,2. Il est donc vraisemblable que les fluctuations dues aux variations saisonnières dans les sols tropicaux (manifestées par les variations des ph) exercent également une action.

Si cependant, la cohésion de certains agrégats était due à ces ciments ne présentant que faiblement le phénomène de gonflement au contact de l'eau, leurs variations de résistance resteraient très limitées. Il suffirait alors que leur cohésion, sans être très élevée, se situe un peu au-dessus du seuil correspondant à la résistance aux actions de nature physique ou physico-chimique mises en œuvre pour que les conditions de stabilité

soient réalisées. Les agrégats de sol rouge seraient alors caractérisés par une cohésion moyenne mais stable et relativement indépendante des conditions de milieu dans des limites données.

Pour vérifier le bien fondé de cette hypothèse, il convient d'entreprendre des mesures de gonflement et de retrait.

3/ - Appréciation du gonflement et du retrait.

La détermination des volumes apparents à l'état sec et à l'état humide permet d'avoir une idée de la réaction des sols à l'humectation (gonflement) et à la dessiccation (retrait).

Le gonflement apparent par exemple est donné par la relation :

$G = \left(\frac{Vh - Vs}{Vs}\right) 100$ où Vh est le volume spécifique apparent humide et Vs le volume spécifique apparent sec.

a) Evaluation du "retrait constaté" au cours de la dessiccation de matériaux pédologiques non remaniés.

Les variations de densité apparente au cours de la dessiccation des matériaux, évaluées par comparaison des poids volumiques des prélèvements faits au cylindre (à l'état humide) et de ceux obtenus par découpage en cubes des monolithes séchés à l'air libre (cf. chap. 8 § A. 1 et 2) donnent une première indication sur l'importance des phénomènes de retrait et sur les profondeurs des niveaux les plus fortement affectés (tableau 10-20), lors d'une forte dessiccation (à l'air libre, en saison sèche).

Tableau 10-20.

RETRAIT MAXIMUM CONSTATE.

		RETRAIT MAXIMUM	
		%	Profondeur
SOL ROUGE	FORET	3,7	50 cm
	CULTURE	5,5	70 cm
SOL BEIGE	FORET	10,7	80 cm
	CULTURE	9,4	50 cm

Les résultats obtenus peuvent être mis en relation avec les caractères morphologiques observés (cf. chapitre 5), en particulier avec l'existence de fentes de retrait :

- étroites, rares, espacées et limitées à l'horizon B 1 (de 40 à 80 cm) dans le sol rouge,
- plus larges et rapprochées dans le sol beige où elles atteignent leur maximum de 35 à 110 cm.

Signalons toutefois que cette estimation ne correspond pas en fait au retrait qui intervient effectivement dans le sol en place, soumis à des dessiccations moins intenses et à des contraintes qui limitent les variations de volume.

Ces réserves étant faites sur la précision et la signification de ces mesures, il convient d'en effectuer d'autres dans des conditions plus rigoureuses.

b) Evaluation du "retrait potentiel".

La mesure porte ici sur de petits agglomérats (Ø 2 à 3 mm) afin de limiter l'effet des contraintes internes et d'améliorer l'échantillonnage (chaque lot étant constitué par une vingtaine d'agrégats).

La méthode utilisée est inspirée de celle proposée par MONNIER et al. (1973) pour la détermination de la densité apparente à l'état sec. Elle consiste à mesurer le volume apparent à partir de la poussée d'Archimède exercée sur un échantillon non enrobé, par du pétrole.

La mesure de la densité apparente à l'état humide porte sur un échantillon de même importance, saturé progressivement d'eau, sous vide et par capillarité (durant 48 heures) puis passé rapidement sur un papier filtre afin d'éliminer uniquement l'excès d'eau présent à l'état de film autour des agglomérats, et enfin immergé dans le pétrole et soumis au même mode opératoire que précédemment.

Deux lots, extraits de chaque prélèvement de sols rouge et beige ont été soumis à ces traitements afin de déterminer Vs et Vh Les premiers, pollués par le pétrole se sont alors révélés inutilisables pour d'autres mesures, tandis que les seconds, protégés de cette pollution par l'eau et séchés à l'air ont été repris pour de nouvelles déterminations à l'état sec.

Ainsi ont été obtenues, pour chaque prélèvement, deux valeurs de Vs (mesurées sur les 2 échantillons) et une valeur de Vh mesurée sur l'un d'entre eux.

L'ensemble des résultats obtenus permet de constater :

- que les valeurs de Vs obtenues directement ou après saturation par l'eau et séchage sont voisines dans la plupart des cas, mais que les secondes sont systématiquement légèrement inférieures au premières (de près de 0,02) dans l'horizon B 1 du sol rouge. Ceci indique que si beaucoup d'agrégats reprennent sensiblement leur volume initial après avoir été soumis à l'action de l'eau et de la dessiccation, ceux extraits de l'horizon B 1, dit de "comportement" du sol rouge, tendent cependant à constituer des assemblages légèrement plus compacts.

- que les variations dues à l'échantillonnage sont telles à certains niveaux (en particulier la où se trouvent des nodules) qu'il est préférable de déterminer le retrait à partir des valeurs de Vh et de Vs déterminées successivement sur le même lot d'agrégats. Ce sont ces valeurs, caractéristiques de deux profils de la toposéquence, qui sont représentées graphiquement sur la fig. 10-9 .

Il ressort de l'examen de ce graphique :

- que le retrait potentiel reste faible dans le sol rouge ($< 4,1$ %) et essentiellement limité à l'horizon B 1. Or, nous savons que la valeur de Vs prise en compte pour cette estimation est faiblement diminuée dans cet horizon à la suite de la saturation par l'eau suivie d'une dessiccation à l'air. Il est donc vraisemblable que l'aptitude au retrait et au gonflement est initialement plus faible dans le sol en place mais qu'elle est ici augmentée par les conditions expérimentales.

- que le retrait et le gonflement potentiel sont beaucoup plus importants dans l'ensemble des horizons B du sol beige. Le fait que les valeurs de Vs diffèrent très peu selon que la mesure a été faite directement ou après saturation par l'eau et séchage à l'air, indique que retrait et gonflement sont ici sensiblement équivalents et que les mesures faites correspondent bien aux caractéristiques de l'échantillon initial.

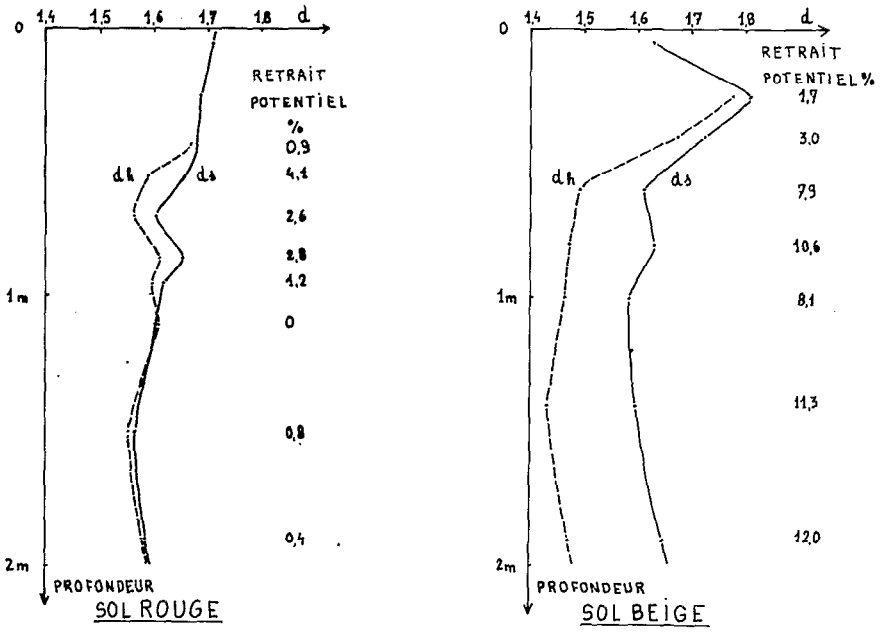


Fig. 10-9 - Variations verticales du retrait potentiel dans le sol rouge et le sol beige.

c) Conclusions.

Ces résultats tendent à confirmer l'hypothèse faite pour exprimer les comportements des matériaux pédologiques soumis aux tests de stabilité structurale. Il semble en effet que si la cohésion des agrégats stables de sol rouge est bien due à des ciments ne présentant que faiblement le phénomène de gonflement et donc peu sensibles à l'action de l'eau, à l'inverse celle des agrégats de sol beige est assurée par le plasma clair dont la réactivité hydrique est bien celle d'une argile.

Il apparaît ainsi que la différence de comportement entre les assemblages de sol rouge et ceux de sol beige porte essentiellement sur l'aptitude de ces derniers à modifier leur volume lorsqu'ils sont mis en présence d'eau.

Or, ce sont précisément dans ces profils de sol beige qu'apparaissent de façon la plus évidente les caractères de différenciation, portant en particulier sur la structure, révélateurs de l'influence exercée par les conditions hydriques propres à chaque horizon sur l'évolution de ses assem-

blages. L'homogénéité plus grande des profils de sol rouge est à mettre en relation avec l'inaptitude de leur matériau à réagir aux variations d'humidité qui les affectent.

4/ - Test de compactage.

a) Méthode.

Le compactage fait intervenir le pouvoir de "lubrification" du système eau-argile qui facilite le réarrangement plus compact des particules.

Utilisant la technique de l'essai "PROCTOR" qu'il applique à deux séries d'échantillons (les uns fabriqués en laboratoire par mélange de sable et de kaolinite, les autres prélevés dans des sols agricoles) FAURE (1975) constate que ces matériaux "ne sont pas sensibles aux effets du compactage (qui ne modifie pas alors sensiblement leur densité apparente) tant que l'argile qu'ils contiennent n'a pas atteint un certain état hydrique défini par la teneur en eau égale à 32 % du taux d'argile ; alors que la moindre variation de la teneur en eau au-delà du seuil critique entraîne des variations importantes de leur compacité" (cf. les courbes relatives aux échantillons de référence fig.10-11).

Il est donc possible, à partir de cette valeur critique déduite de la courbe PROCTOR (marquée par un "coude") de déterminer la teneur en argile ($\phi < 2\ \mu$) "équivalente" qui correspond à la sensibilité au compactage effectivement manifestée au cours de l'essai.

Cette manipulation a été réalisée par FAURE sur 4 de nos échantillons de Casamance (sols rouge et beige, prélevés en surface et dans l'horizon B 21) ; l'interprétation des courbes étant faite par référence à toutes celles obtenues et étudiées par cet auteur.

b) Résultats.

Deux courbes caractérisent les échantillons prélevés à moyenne profondeur dans les deux sols :

Sur celle de l'horizon B 21 de sol beige (fig.10.10), le coude (point B) apparaît pour une teneur en eau de 11,2 %, ce qui indique une teneur en argile "équivalente" égale à : 11,2 / 0,32 = 35 %, peu différente de celle obtenue par l'analyse granulométrique : 37 %.

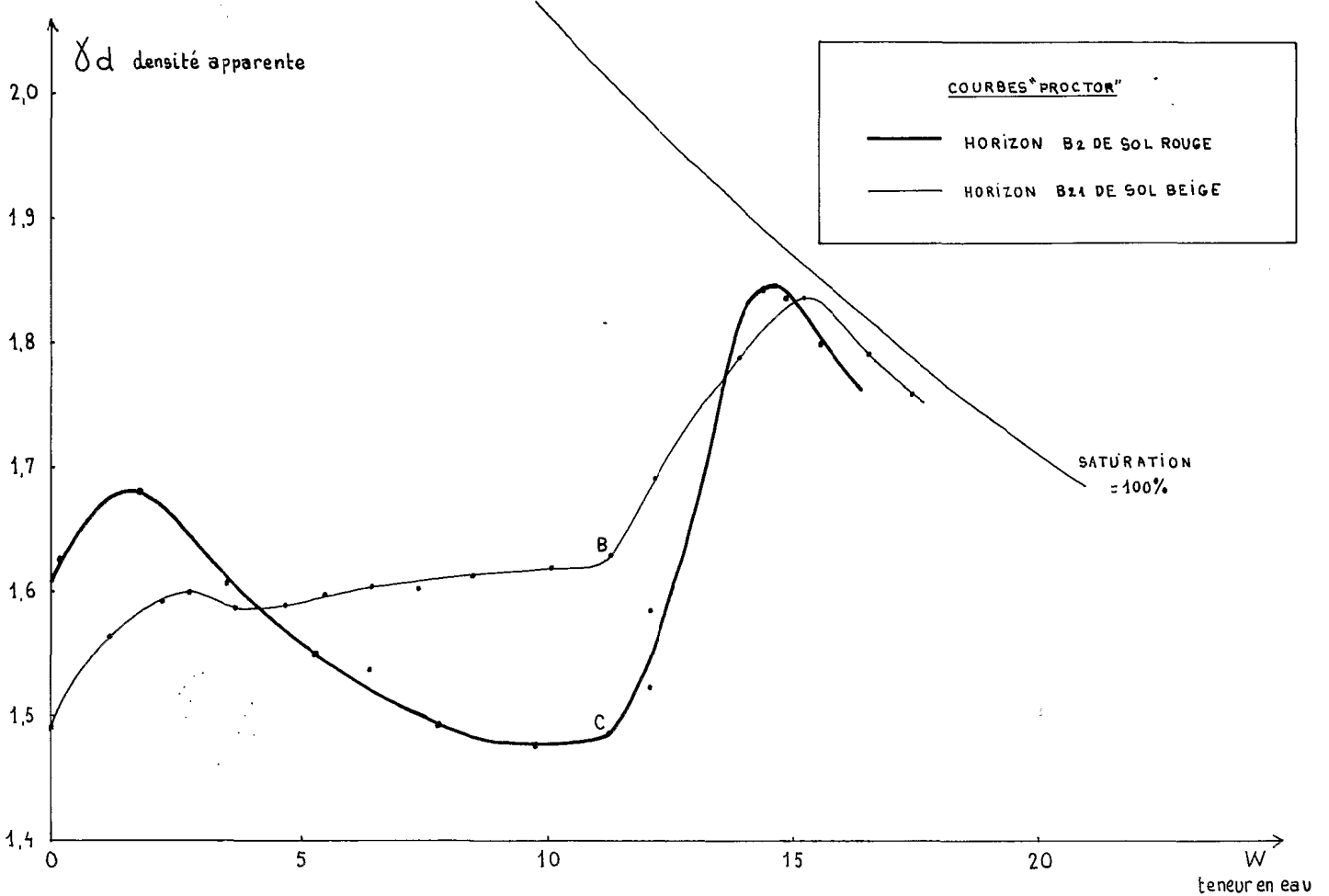


Fig. 10-10. Courbes "Proctor" caractéristiques des horizons B 2 de sol rouge et B 21 de sol beige.

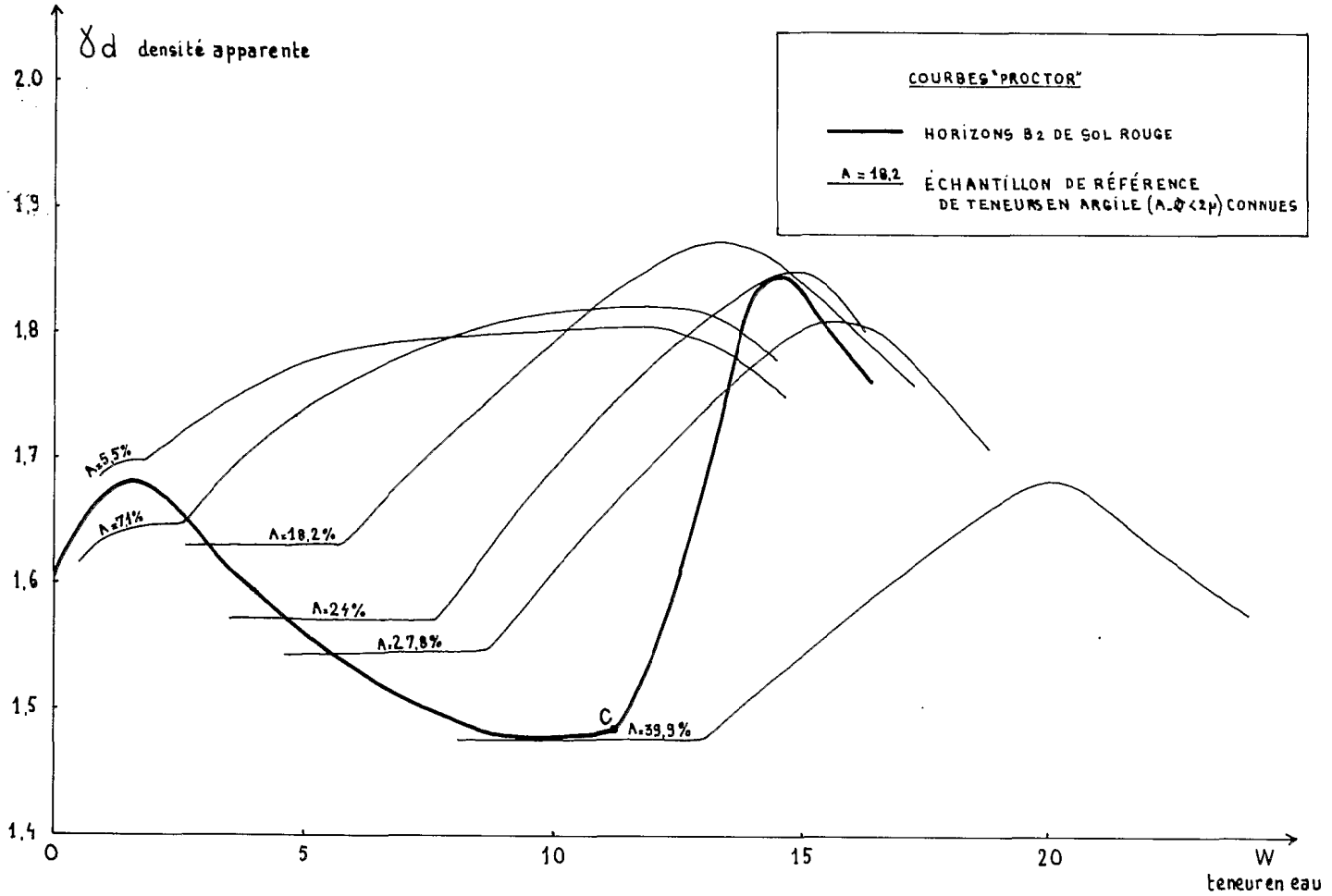


Fig. 10-11. Courbe "Proctor" caractéristique du matériau de l'horizon B 2 de sol rouge, comparée à celles d'échantillons de référence de teneurs en argile connues.

A droite du maximum, l'humidité est inférieure de 3 à 4 % à celle qui correspondrait à une saturation totale de l'échantillon. C'est là un comportement "normal".

La courbe relative à l'horizon B 2 de sol rouge présente une allure différente (fig.10.11).Pour faciliter son interprétation, des courbes de référence correspondant à des échantillons de teneurs en argile connues ont été reportées en surcharge sur la figure10.11. Il apparaît possible de considérer ce matériau comme ayant une teneur en argile "équivalente" qui évolue au cours de la manipulation, à mesure qu'est augmentée la teneur en eau. Le coude (point C) apparaît pour une teneur en eau sensiblement identique à celle relevée dans le sol beige (11,2 %), correspondant à un même taux d'argile "équivalente" (35 %), cette fois très inférieur à celui fourni par l'analyse granulométrique (45 %).

Une densité apparente moindre, à ce stade de l'essai, indique que le "squelette" diffère alors, par sa nature, de celui du sol beige (il serait constitué, en partie, de micronodules).

A droite du maximum, enfin, l'échantillon est moins saturé que le beige : ce défaut provenant vraisemblablement du "blocage" de l'argile par les hydroxydes de fer.

Tous ces indices révèlent un comportement tout à fait inhabituel (par rapport à l'ensemble des échantillons de référence) particulier au matériau prélevé dans le sol rouge.

Deux autres courbes (non reportées sur la figure) caractérisent les horizons superficiels.

Celle de l'horizon A de sol beige présente un coude pour une teneur en eau de 3,6 %, qui correspond à un taux d'argile "équivalent" de 11,2 %, à peine supérieur à celui donné par l'analyse granulométrique.

Celle de l'horizon A du sol rouge, très comparable, révèle un taux d'argile'équivalent" un peu plus faible, légèrement inférieur, cette fois, à celui donné par l'analyse granulométrique (11,5 %).

Le comportement de ces deux échantillons est donc "normal", à une exception près toutefois : le défaut de saturation (à droite du maximum) est plus important dans l'échantillon de sol rouge que dans celui de sol beige, révélateur d'un faible "blocage" de l'argile qui pourrait provenir de la présence d'hydroxydes de fer et/ou de matière organique.

Les taux d'argile "équivalents", déduits des courbes PROCTOR, et les résultats fournis par l'analyse granulométrique sont rassemblés dans le tableau 10-21.

Tableau 10-21

COMPORTEMENT DES MATERIAUX BEIGE ET ROUGE SOUMIS AU COMPACTAGE : TAUX D'ARGILE "EQUIVALENTE" ET GRANULOMETRIQUE.

SOL	HORIZONS	ARGILE "équivalente" %	ARGILE granulométrique %	COMPORTEMENT
BEIGE	A	11,2	10,3	NORMAL
	B 21	35	37	NORMAL
ROUGE	A	11,2	11,5	NORMAL (léger "blocage" de l'argile)
	B 2	6 à 35	45	ANORMAL ("blocage" de l'argile)

c) Conclusions.

Nous retiendrons surtout de ces essais :

- que manifestement, une fraction de la kaolinite contenue dans le matériau de l'horizon B 2 de sol rouge, ne participe pas, avec l'eau, à la lubrification du système. On peut estimer que c'est cette fraction, difficilement accessible à l'eau, qui est à l'origine du défaut de saturation observé.

- que l'action mécanique de compactage, en présence d'eau, rend progressivement active au cours de l'essai (en ce qui concerne la lubrification) une partie de la kaolinite qui était considérée comme inerte et intervenait avec le squelette quartzeux comme constituant de la charpente du sol rouge.

- que le sol beige se comporte, pour sa part, vis-à-vis de l'essai de compactage PROCTOR, comme un matériau "normal" constitué

d'argile et de sable.

x

x x

L'utilisation de la méthode d'analyse d'agrégat et des tests mécaniques révèle ainsi que deux comportements physiques distincts caractérisent les matériaux rouges et les matériaux beiges mis en présence d'eau, et expliquent les différences de fonctionnement hydrique décelées dans les sols en place (cf. chapitre 8).

Leurs résultats nous indiquent également que, bien que les assemblages micronodulaires des sols rouges présentent une grande fragilité, leur dissociation complète ne peut cependant être obtenue sans utilisation d'une énergie appréciable (ou d'un traitement chimique, tel que le réactif de TAMM, capable d'affaiblir les liaisons interparticulaires).

Chapitre 11

APPROCHE D'UNE ÉTUDE DE L'ORGANISATION PAR VOIE EXPÉRIMENTALE PROBLÈME DU MASQUAGE ET DU DÉMASQUAGE DE LA KAOLINITE

Les études faites sur les matériaux naturels ont mis en évidence le comportement anormal du sol rouge : la plus grande partie de la kaolinite qui y est contenue ne joue pas en effet le rôle habituellement imparti aux minéraux argileux, mais se trouve "inactivée" sous forme d'assemblages inertes plus ou moins isotropes ne réagissant, ni à l'action ménagée de l'eau (dont la pénétration entre les cristallites provoque habituellement une variation du volume apparent et assure ainsi la lubrification du système soumis à des contraintes mécaniques), ni à celle de réactifs dispersants classiques qui, par leur seule intervention sur les charges superficielles compensées par des ions échangeables, assurent d'ordinaire la mobilisation des particules et leur mise en dispersion.

A ce comportement particulier, s'oppose celui plus normal des sols beiges.

Les études faites jusqu'à présent n'apportent que des présomptions sur l'origine possible de cette anomalie :

- l'observation microscopique (cf. chapitre 9) révèle que, dans les sols rouges et les sols de transition, les indices de mobilisation localisée de l'argile s'accompagnent souvent de signes d'une ségrégation des oxy-hydrates de fer et de la kaolinite, manifestée en particulier par des variations de la couleur et de l'opacité du plasma : lisérés jaunes orientés et ferri-argilanes zonés dont les parties les plus décolorées présentent des discordances résultant de déplacements.

- les études comparatives de dispersion (cf. chapitre 10) montrent que dans un même matériau pédologique, les phases les plus dispersables du plasma

sont un peu moins pourvues en oxy-hydrates de fer que celles qui sont "bloquées" et beaucoup moins que celles qui sont "cimentées". Cette indication n'a cependant qu'une valeur relative puisque l'on trouve, dans d'autres parties du profil (en particulier dans les horizons de surface, cf. tableau 10-10) des fractions facilement dispersables très riches en oxy-hydrates de fer. Tout dépend donc de la forme sous laquelle se trouvent les composés du fer et de leur interaction avec la kaolinite qui semblent être changeantes selon les horizons et selon les profils.

Dans ces conditions, les corrélations établies entre la stabilité des assemblages et les teneurs en différentes formes du fer (MAC INTYRE (1956), CHESTERS (1957), KEMPER et KOCH (1966), ARCA et WEED (1966)...) n'ont pas valeur de preuve et sont refutées par certains, en particulier par DESHPANDE et QUIRK (1964-1968) qui estiment que d'autres données (en particulier l'aluminium "actif"), elles-mêmes correlées avec les oxydes de fer libres, joueraient un rôle déterminant.

Pour mieux connaître les processus responsables de l'immobilisation et de la mobilisation de la kaolinite dans les sols rouges de Casamance, il s'avère donc nécessaire de faire abstraction de la complexité du milieu pédologique et de tenter de reproduire ou de transformer expérimentalement des assemblages de kaolinite présentant des caractéristiques analogues à celles des agrégats des sols étudiés.

Dans la deuxième partie de l'étude, le problème du démasquage de l'argile contenue dans les agrégats de sol rouge sera abordé dans un contexte plus dynamique, en procédant à des essais de fonctionnement de systèmes reconstitués en colonnes.

A - ETUDES EXPERIMENTALES PORTANT SUR LA FABRICATION ET LA TRANSFORMATION DES AGREGATS DE KAOLINITE.

Elles ont été réalisées de façon à établir les relations qui existent entre :

- les caractéristiques superficielles des argiles

intervenant en particulier sur le phénomène de dispersion,

- les possibilités d'existence d'agrégats stables,
- les réactivités de ces agrégats.

Ceci afin de nous fournir quelques-unes des connaissances nécessaires à une meilleure compréhension des mécanismes qui interviennent sur le "masquage" et le "démasquage" de l'argile dans les sols étudiés.

I - ETUDE DES POSSIBILITES DE REAGREGATION, ET DE TRANSFORMATION DU MODE D'ASSEMBLAGE, DE L'ARGILE DES SOLS ROUGE ET BEIGE DE CASAMANCE.

Ces premières manipulations ont été réalisées sur les matériaux naturels des sols de la toposéquence que l'on s'est efforcé, soit de dissocier puis de réagréger, soit encore de transformer en les soumettant à l'action de l'eau et à celle du réactif de TAMM.

1/ - Réactivité des argiles extraites du sol rouge et du sol beige.

a) Séparation de l'argile et préparation de galettes.

Les argiles ($\varnothing < 2\ \mu$) utilisées proviennent d'un échantillon de sol rouge typique à structure micronodulaire et d'un échantillon de sol beige dépourvu de nodules.

Plusieurs traitements différents sont nécessaires pour séparer, par décantations successives, la totalité des fractions argileuses caractéristiques du sol rouge.

Si l'on réalise une analyse granulométrique classique avec les traitements : H_2O_2 - K Cl - dispersion NH_4OH, on ne récupère que 22, 3 % d'une argile ($\varnothing < 2\ \mu$) contenant 10, 4 % de Fe_2O_3. Cela signifie que la fraction restante de l'argile (soit 22, 5 %) ne réagit pas dans les conditions de dispersion habituelle et peut donc être considérée comme "masquée" (au sein de pseudoparticules). Pour la récupérer, on a fait alors subir aux échantillons un traitement aux ultrasons ; ceci a permis d'extraire 18, 5 % d'argile contenant 11, 9 % de Fe_2O_3 qui correspond donc à de l'argile masquée dissociée. Mais cette argile a un comportement inhabituel puisqu'elle

ne flocule pas en milieu neutre. Par contre, si on fait subir à de tels échantillons un traitement TAMM (à l'obscurité), on n'extrait que 0,3 % de Fe_2O_3 ; en même temps on transforme toute l'argile masquée en une argile, contenant 11,6 % de Fe_2O_3 mais floculant alors parfaitement en conditions neutres comme dans les cas habituels. Nous avons désigné cette fraction sur le terme d'argile déferrisée.

Finalement, en procédant ainsi, on obtient 3 sortes d'argile : libre, masquée et déferrisée qui proviennent d'un même échantillon de sol rouge.

Un seul traitement : H_2O_2, K Cl, dispersion NH_4OH, suffit cependant pour extraire la presque totalité de l'argile du sol beige.

Les suspensions d'argile ainsi obtenues sont neutralisées, puis additionnées de 10 ml de solution de $Mg\ Cl_2$ N, de façon à obtenir leur floculation, elles sont ensuite lavées à l'eau distillée jusqu'à élimination des chlorures et centrifugées une dernière fois pour obtenir des pâtes argileuses (contenant près de 150 % d'eau). Celles-ci sont alors essorées sur Büchner, l'épaisseur de la galette obtenue étant de l'ordre de 2 cm.

Les différentes phases de cette préparation ainsi que les caractéristiques principales des matériaux obtenus sont résumées dans le tableau 11-1.

b) Etude des galettes.

Une fois démoulées, les galettes d'argile séchées à l'air libre, ne sont plus soumises à aucune succion orientée. C'est donc l'organisation acquise au cours de la première phase de préparation qui va guider les déformations de leur volume externe au cours de leur dessiccation.

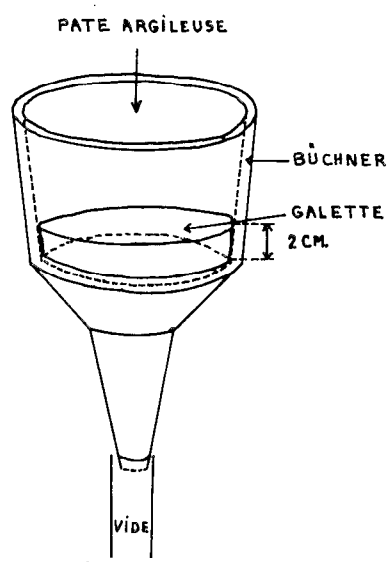
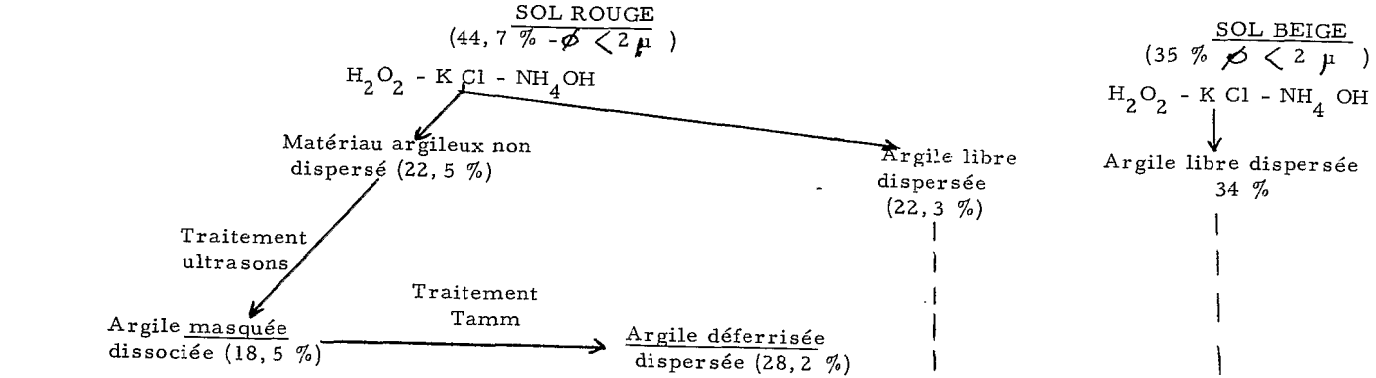


Fig. 11-1 - Préparation des galettes d'argile.

Tableau 11-1.

LES ARGILES EXTRAITES DU SOL ROUGE ET DU SOL BEIGE - LEUR CARACTERISTIQUES DE COMPORTEMENT EN SUSPENSION, LEUR TENEUR EN FER ET LEUR SURFACE SPECIFIQUE.



Comportement suspension (pH=7)	ne flocule pas		flocule	flocule	flocule
Teneur en Fe_2O_3 (%)	11, 9 %	Δ = 0, 3 %	11, 6 %	10, 4 %	5, 1 %
Surface spécifique (m^2/g)	51		52	50	55

a) Isotropie du retrait.

Elle est évaluée par l'étude des rapports des paramètres du volume, selon la méthode utilisée par TESSIER (1975). Les mesures de l'épaisseur (e) et du diamètre (d) des galettes d'argile sont faites (au moyen d'un pied à coulisse) à l'état humide (e_o et d_o), puis après dessiccation jusqu'à poids constant (e et d). Toute variation de l'épaisseur qui ne s'accompagne d'aucune modification du diamètre révèle que le retrait s'est effectué selon l'axe du cylindre (formé par la galette) et qu'il doit être considéré comme anisotrope. A l'inverse, une décroissance proportionnelle des deux paramètres résulte d'un retrait isotrope. Dans ces conditions, le rapport $A = \frac{e/eo}{d/do}$ exprime le degré d'isotropie (il est égal à 1 pour un retrait isotrope et d'autant plus inférieur à cette valeur que le retrait s'effectue préférentiellement selon l'axe).

Les résultats obtenus figurent dans le tableau 11-2.

b) Orientation des particules de kaolinite à l'état humide.

On peut l'évaluer à partir des spectres de rayons X, selon la méthode proposée par TESSIER (1975).

Le spectre obtenu, par transmission de rayonnement Cu, à travers une tranche de galette ressuyée, donc découpée à l'état humide (avec un fil de tungstène), selon un angle par rapport au plan de base égal à : $\frac{\pi}{2} - \theta = 83,5°$, présente des anneaux de diffraction hétérogènes dont les intensités maximales sont situées selon des plans d'orientation préférentielle des cristallites d'argile (planche 11-1).

L'intensité de diffraction en chaque point de l'anneau, sur la raie 001, dépend de la quantité de matière soumise au rayonnement, du temps d'exposition et de l'orientation des particules par rapport au faisceau de rayons X. Les densités optiques du film, mesurées sur un demi-anneau par des traversées successives, selon des angles décalés de 6 en 6°, reportées sur un graphique, dessinent ainsi des courbes représentatives de l'état d'orientation des cristallites d'argile dans les assemblages formés.

Un indice d'orientation, représentatif du nombre de particules présentant une orientation maximale par rapport au nombre de particules non orientées, peut ainsi être établi ($R = \frac{\text{I maximum}}{\text{I minimum}}$).

Les résultats obtenus figurent également dans le tableau 11-2.

Tableau 11-2.

ISOTROPIE DU RETRAIT ET INDICES D'ORIENTATION DES NEO-AGREGATS

		SOL ROUGE			SOL BEIGE
		Argile "masquée"	Argile déférrisée	Argile libre	Argile libre
Variation des paramètres du volume au cours du retrait	e/eo	0, 735	0, 672	0, 668	0, 659
	d/do	0, 778	0, 797	0, 798	0, 805
	$\frac{e/eo}{d/do}$	0, 945	0, 843	0, 837	0, 819
	Retrait :	isotrope	faiblement anisotrope	faiblement anisotrope	anisotrope
Organisation interne	Indice R d'orientation	2, 4 très peu orienté	6, 9 faiblement orienté	3,2 néo-agrégats	11, 2 orienté

On constate que l'argile masquée conduit à une organisation fortement isotrope, caractérisée par un faible indice d'orientation et donc à un arrangement tridimensionnel ; mais qu'il suffit d'extraire 0, 3 % de Fe_2O_3 (par le traitement TAMM) pour que se développe une certaine anisotropie, légèrement inférieure toutefois à celle présentée par l'argile "libre" ou par l'argile du sol beige.

γ) Gonflement potentiel et dispersabilité des néo-agrégats.

La technique utilisée par la mesure du gonflement potentiel est la même que celle appliquée aux agrégats naturels (cf. chapitre 10).

L'humectation sous vide et par capillarité est poursuivie durant 48 heures de façon à permettre une saturation satisfaisante des échantillons.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau 11-3.

Tableau 11-3.

GONFLEMENT POTENTIEL ET DISPERSABILITE DE NEO-AGREGATS.

	SOL ROUGE			SOL BEIGE
	Argile masquée	Argile déferrisée	Argile libre	Argile libre
V* sec	0, 741	0, 667	0, 655	0, 681
V* humide	0, 752	0, 742	0, 736	0, 772
gonflement potentiel %	1, 5	11, 2	12, 4	13, 4
A % dispersé	48, 8	61, 4	54, 6	74, 5

* V. désigne le volume spécifique apparent.

Il ressort de ces données que les volumes spécifiques apparents des néo-agrégats constitués par les 3 sortes d'argile extraites du même échantillon de sol rouge diffèrent assez peu à l'état humide (de 0, 752 à 0, 736), mais que les écarts tendent à s'amplifier fortement à l'état sec (de 0, 741 à 0, 655).

Les variations entre ces deux états, dues au mécanisme de gonflement (et de retrait), évaluées ici dans des conditions optimales ("gonflement potentiel") sont faibles dans les agrégats constitués à partir de l'argile "masquée", plus élevées et sensiblement égales dans ceux qui sont formés à partir des argiles "déferrisée" ou "libre".

Il semble donc que la limitation du gonflement potentiel soit ici liée à une réduction des possibilités de réarrangement des particules lors du départ d'eau (par dessiccation des galettes) maintenues associées sous forme d'assemblages tridimensionnels qui laissent place à une porosité ultramicroscopique importante. Nous sommes conduits à supposer que les composés ferriques extraits par le traitement TAMM (0, 3 % de Fe_2O_3) sont responsables de ce comportement particulier.

La résistance des néo-agrégats au traitement dispersant ménagé (H_2O_2 - K Cl - NH_4 OH), exprimée par le taux d'argile non dispersée, apparaît ici comme une caractéristique générale, plus ou moins accentuée selon les échantillons : sensiblement diminuée par l'effet du traitement TAMM dans ceux qui proviennent du sol rouge, elle est nettement plus faible dans l'argile du sol beige.

Les particules complexes (ou pseudoparticules) qui ont résisté au traitement envisagé, ont, pour la plupart, des dimensions comprises entre 20 et 200 µ. Examinées à la loupe binoculaire, celles formées d'argile rouge présentent un aspect très comparable à celui des micronodules (mis à part le fait qu'on n'y distingue pas de quartz inclus).

Cette tendance à la "pseudoparticulation" serait ici amplifiée (par rapport à ce qu'elle est dans l'échantillon de sol initial) du fait du mode de préparation qui fait succéder à une dissociation des particules, une dessiccation progressive, relativement poussée, qui a pour effet de les porter au contact les unes des autres dans des conditions qui favorisent l'établissement de liaisons entre elles.

Le traitement "TAMM obscurité", appliqué à ces assemblages, disperse, dans tous les cas, la totalité de l'argile.

c) Conclusions

Préparés dans des conditions physiques et physico-chimiques contrôlées, ces néo-agrégats, constitués d'argiles dispersées à partir des sols étudiés, et plus particulièrement du sol rouge, sont ainsi caractérisés par des degrés d'anisotropie du retrait et par des organisations internes différentes selon qu'il s'agit de fractions libres ou "masquées" et selon qu'elles proviennent du sol rouge ou du sol beige. Il existe donc un déterminisme de l'arrangement des particules qui dépend de leurs caractéristiques propres, indépendemment de tout autre facteur d'organisation.

A ces arrangements différents correspondent des comportements physiques particuliers, manifestés, entre autre par les variations du volume apparent au cours de l'humectation qui diminuent lorsque se généralisent les assemblages isotropes, plus ou moins résistants aux traitements dispersants ménagés (ou "pseudoparticules"). Ces comportements sont de nature à orienter la différenciation morphologique des profils : dans le sens d'un

élargissement de la structure et d'une redistribution des constituants argileux ou, à l'inverse, d'une dominance des micronodules qui résulteraient de l'individualisation des assemblages isotropes les plus stables.

Dissociée par action mécanique, sans autre transformation importante de son état, une argile serait ainsi apte à reproduire des assemblages semblables à ceux dont elle provient. Il semble que ce soit le cas de l'argile dissociée par ultrasons à partir des "pseudoparticules" rouges qui tend à reformer des assemblages isotropes. Un processus semblable expliquerait la présence des argilanes rouges très peu différenciés, observés au sommet de l'horizon B 2 du sol rouge typique, progressivement intégrés à la structure micronodulaire isotrope : leurs constituants proviendraient du niveau d'effondrement de cette structure observé plus haut (cf. chapitre 9).

La transformation de la fraction argileuse consécutive au traitement "TAMM" aurait pour effet de modifier les caractéristiques propres des particules qui déterminent leurs possiblités d'assemblages : ainsi les deux fractions séparées à partir du même sol rouge (par ultrasons et par le traitement "TAMM") s'organisent de façons différentes au cours de l'expérimentation.

Ce traitement complexant n'extrait cependant que de petites quantités de fer. Ceci nous conduit à attribuer un effet très important (responsable du déterminisme de l'organisation) à de faibles teneurs en composés facilement extractibles mais qui occuperaient des positions bien déterminées. Il est vraisemblable qu'il s'agit ici d'ions ferriques plus ou moins hydroxylés, susceptibles de se fixer sur les positions d'échange de la kaolinite. Comme la liaison entre le réseau et les cations ferriques superficiels est relativement forte (PEDRO, 1976), ces ions abaisseraient nettement le potentiel de surface des particules argileuses qui deviendraient ainsi très peu réactives du point de vue colloïdal.

Afin de mieux connaître l'action exercée par le traitement TAMM sur l'organisation et sur la réactivité des matériaux pédologiques, nous avons effectué d'autres manipulations sur des agrégats.

2/ Etude comparée de l'action de l'eau et du réactif de TAMM sur l'organisation et sur le comportement des agrégats de sol rouge.

a) Protocole expérimental.

Deux lots d'agrégats naturels calibrés (⌀ 2 à 3 mm) de sol rouge sont humectés par l'eau, sous vide et par capillarité (afin d'éviter leur désagrégation). L'un d'entre eux est alors immergé dans l'eau ; le deuxième en revanche est maintenu dans le réactif de TAMM (à l'abri de la lumière) durant 3 heures, avant que de l'eau ne soit progressivement substituée au réactif de TAMM afin d'effectuer un rinçage. Les deux échantillons sont alors lavés par des solutions alcooliques (de manière à éliminer le reliquat de réactif de TAMM sans provoquer la dispersion), puis séchés à l'air libre.

Chaque lot est divisé alors en 3 parties :

- une destinée à la préparation de lames minces,
- une autre pour des évaluations de gonflement potentiel,
- une troisième utilisée pour des mesures de capacité d'échange cationique.

b) Etude micromorphologique des agrégats traités.

Tous les agrégats traités par l'eau présentent des aspects comparables (planche 11, dessin 2). Ils ne diffèrent des matériaux non traités que par le développement et l'accentuation des contrastes entre des argilanes rouge jaune, peu orientés, localement à peine zonés et les micronodules rouges (dont ils occupent les espaces internodulaires) qui tendent ainsi à mieux s'individualiser.

Le seul effet d'une saturation par l'eau (qui n'affecte jamais ces matériaux dans les conditions naturelles) serait donc de provoquer une réorientation localisée du plasma et une différenciation accrue desmicronodules isotropes.

Les agrégats traités par le réactif de TAMM ont une organisation très différente (planche 11, dessin 3). Seuls y subsistent des micronodules de petite taille (⌀ 50 µ), plus ou moins isotropes, souvent entourés de liserés d'argile orientée, et quelques fragments d'argilanes jaunes (ou papules) noyés dans un plasma argilosépique.

L'effet du traitement TAMM a donc été de dissocier la plus grande partie des assemblages isotropes, n'en laissant subsister que des reliques sous forme d'îlots.

c) Modifications du gonflement potentiel consécutives aux traitements.

On a déjà constaté que la saturation par l'eau des agrégats de l'horizon B 1 de sol rouge avait pour effet d'augmenter faiblement leurs possibilités de gonflement (cf. chapitre 10).

Le traitement par le réactif de TAMM exerce une action beaucoup plus marquée qui se manifeste à l'observation même par une modification de l'aspect des agrégats au cours de l'humectation sous vide : éclaircissement de la couleur, formation de fissures et effondrement.

Les résultats des mesures réalisées figurent dans le tableau 11-4.

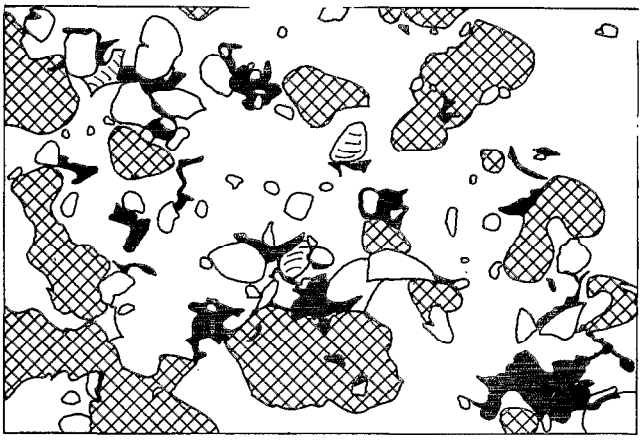
Tableau 11-4.

VARIATION DU GONFLEMENT POTENTIEL DES AGREGATS DE SOL ROUGE PAR L'EFFET DU TRAITEMENT TAMM.

	VOLUME SPECIFIQUE APPARENT		GONFLEMENT POTENTIEL
	à l'état sec	à l'état humide	
Non traité	0, 588	0, 588	0 %
Traité "TAMM obscurité"	0, 562	0, 676	20, 3 %

On note que les variations portent à la fois sur le volume spécifique apparent à l'état sec qui diminue (indice d'un réarrangement plus compact des particules), et sur la même mesure à l'état humide qui augmente, révélatrice de la pénétration de films d'eau entre la plupart des particules. Déduit de ces mesures, le gonflement potentiel présente ici une valeur extrême.

Le traitement "TAMM obscurité" a donc pour effet de libérer et d'accroître fortement les possibilités de gonflement.

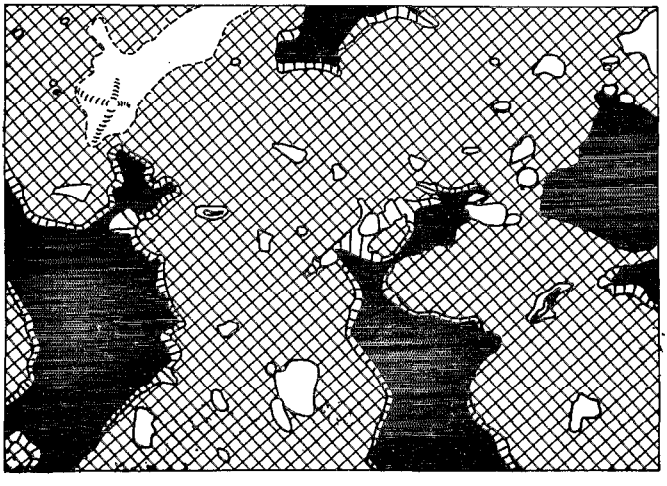


3 AGRÉGATS TRAITÉS PAR LE RÉACTIF DE TAMM

Subsistent seuls quelques micronod et fragments d'argilane rouge jaune noyés dans un plasma argilosepique

2 AGRÉGATS SÉCHÉS PUIS TRAITÉS PAR L'EAU

Développement des contrastes entre les argilanes rouge jaune et les micronodules rouges.



1 TÉMOIN NON TRAITÉ

Structure micronodulaire continue

Pl. 11 — Action de l'eau et du réactif de Tamm sur l'organisation des agrégats de sol rouge.

d) Modifications de la capacité d'échange.

Le fait que le traitement complexant provoque une forte augmentation des possibilités d'hydratation attire l'attention sur les phénomènes de surface, en particulier sur la possibilité de fixation de composés ferriques en position de compensation de déficit de charges, qui seraient vulnérables à l'action de réactifs complexants.

Les mesures effectuées sur une trentaine d'échantillons révèlent toutes une forte augmentation de la capacité d'échange cationique consécutive au traitement "TAMM" (tableau 11-5).La variation est moindre dans les sols rouges transformés par la culture et dans les sols beiges. Elle est nulle lorsque le même traitement est appliqué à la kaolinite de Provins.

Tableau 11-5.

VALEURS MOYENNES DES CAPACITES D'ECHANGES MESUREES AVANT ET APRES TRAITEMENT "TAMM OBSCURITE".

	Sol rouge typique (horizon B2)	Sol rouge cultivé depuis 90 a (horizonB2)	Sol beige horizon B1	Kaolinite de Provins
Capacité d'échange cationique (en millieq./100 g) non traité	4,2	3,8	4,7	13,9
Capacité d'échange cationique (en millieq./100 g) traité (Tamm)	7,8	5,0	6,3	13,8
Augmentation relative	+ 86 %	+31 %	+34 %	+ 0 %

Ces résultats constituent un argument important en faveur de l'hypothèse avancée. Les gains de capacité d'échange correspondraient ainsi aux charges négatives initialement compensées par les composés ferriques, mais libérées sous l'action du traitement TAMM. L'absence de variation dans le cas de la kaolinite de Provins indiquerait que cet effet ne résulte pas d'une attaque de la structure cristalline.

e) Conclusion : nous sommes conduits à admettre que la compensation d'une partie des charges superficielles de la kaolinite des sols rouges se fait par l'intermédiaire d'ions hydroxo-ferriques, plus ou moins polymérisés qui bloquent une partie de la capacité d'échange (car ils ne sont pas échangeables) ; c'est ce qu'on peut appeler la "ferrisation" de la kaolinite.

Ce blocage interviendrait également sur les forces ioniques interparticulaires qui, au cours de la dissociation et de la recombinaison des assemblages déterminent l'état d'organisation.

Il doit être possible de le provoquer expérimentalement, en partant d'une kaolinite de gisement.

II - ETUDE DE L'ADJONCTION CONTROLEE DE FER A UNE KAOLINITE DE GISEMENT (BASSIN DE PROVINS).

Fabrication d'agrégats artificiels, leur nature, leur constitution et leur organisation interne.

1/ - Données bibliographiques.

Trois expériences vont dans le sens de la démarche entreprise ici :

- Au cours de la première, MONNIER (1965) constate que la cofloculation d'argile et d'humus en présence de chlorure ferrique (ou de chlorure d'aluminium) permet de fabriquer des agrégats beaucoup plus hydrophobes que ceux formés en présence de Cl_2Mg ou de Cl_2Ca. Les résultats qu'il obtient sont reportés dans le tableau 11-6 ; rappelons à leur sujet que le caractère hydrophobe est exprimé par le taux d'agrégats résistants au prétraitement benzène, tandis que le caractère de cohésion est révélé par le taux d'agrégats résistants au prétraitement "alcool" (cf. chapitre 10, B).

Il est remarquable de constater que c'est le caractère de mouillabilité qui établit ici une différence entre les ions alcalino-terreux (Ca et Mg) d'une part, les éléments Fe et Al d'autre part, tandis que le caractère de cohésion reste invariable. Ceci tendrait à montrer que les

phénomènes de surface, responsables de la propagation des films d'eau dans l'assemblage sont ici déterminants.

Tableau 11-6.

INFLUENCE DE DIVERS CATIONS SUR LA STABILITE DES AGREGATS (SELON MONNIER, 1965)

TAUX D'AGREGATS % RESISTANTS AUX PRETRAITEMENTS	AGENTS FLOCULANTS			
	Cl_2Mg	Cl_2Ca	Cl_3Al	Cl_3Fe
ALCOOL (cohésion)	5, 3	4, 8	7	5, 6
BENZENE (mouillabilité)	1, 0	1, 6	22, 8	27, 6

- La deuxième expérience due à BLACKMORE (1972) porte sur les "mécanismes de cimentation des argiles (kaolinite, illite, bentonite) par le fer". Dans cette expérience, l'auteur compare les quantités d'argile liée (c'est-à-dire non dispersée par un traitement classique) après mise en contact des minéraux dispersés avec les composés ferriques formés aux différents stades de l'hydrolyse d'une solution de perchlorure ferrique ; il constate alors que des assemblages stables ne prennent naissance qu'en présence de monomères solubles et d'ions mono, di et oligo-nucléaires hydroxo-ferriques solubles à des pH inférieurs à 4 et que les précipités gélatineux, formés ultérieurement, sont inefficaces lorsqu'ils sont seuls ; par contre, ils combinent leurs effets à ceux des premiers pour produire des agrégats particulièrement résistants au traitement normal de dispersion.

- La troisième expérience, réalisée par FOLLET (1965) a trait aux modalités de fixation de "l'hydroxyde ferrique colloïdal" sur la kaolinite. Opérant à des pH compris entre 2 et 4, 4, cet auteur provoque l'adsorption des hydrates ferriques sur une kaolinite pure (formant de fines ponctuations ordonnées sur une face des cristallites, visibles au microscope électronique), même en présence d'ions en compétition. Il explique ce

résultat par le fait que les particules colloïdales, relativement grosses, puisque leur dimension minimum est de l'ordre de 30 Å, portent de nombreuses charges positives (comparées à celles des ions Ca et Mg) et, de ce fait, tendent à se concentrer autour des charges négatives de la kaolinite. Dans ces conditions, le problème essentiel revient donc à obtenir un sol d'hydroxydes ferriques dont les particules colloïdales aient des dimensions et des charges appropriées pour se fixer sur les sites d'échange de la kaolinite. Il est aussi essentiel d'obtenir une dissociation suffisante des particules de kaolinite pour qu'une grande partie de leur surface soit accessible.

2/ - Etude de la ferruginisation d'une kaolinite Ca.

a) Préparation des galettes.

Le minéral argileux utilisé est la kaolinite de gisement du bassin de Provins, étudiée et décrite par FLEURENCE et NICOLAS (1966) : pure, contenant seulement près de 1, 6 % de fer ; sa capacité d'échange cationique, relativement élevée atteint 30 milliéquivalents pour 100 grammes de minéral deshydraté ; sa surface, déterminée à partir des isothermes d'absorption de l'azote est de 63 m^2/g (soit une valeur supérieure à la moyenne) ; elle apparaît au microscope sous la forme de plaquettes hexagonales très bien délimitées, dont le diamètre, proche de 0, 2 µ, relativement homogène, est voisin de celui observé dans les sols rouge et beige de Casamance.

Après avoir été rendue à l'état calcique, cette kaolinite est mise en suspension dans l'eau (agitation 8 h) à la concentration de 2 grammes d'argile sèche par litre. Cette suspension est amenée à pH 4 par addition de petites quantités d'H Cl N/10 avant de recevoir une solution fraîche de perchlorure ferrique diluée (0, 5 g de $Fe\ Cl_3/l$) ; les quantités apportées sont calculées de façon que la teneur en fer de l'échantillon varie entre 0 et 11 % de Fe_2O_3. L'agitation est alors maintenue pendant 8 heures à un pH voisin de 3, 5, de façon à créer des conditions favorables au développement des formes transitoires solubles mono, di et oligo-nucléaire hydroxo-ferriques. Après cela, le milieu étant neutralisé par addition d'ammoniaque, l'argile est séparée par centrifugation, lavée, homogénéisée et enfin essorée sur Büchner (l'épaisseur de la galette ainsi formée est de l'ordre de 3 centimètres). Lors de cette dernière opération, on constate que le ressuyage est

d'autant plus rapide que la teneur en fer est plus élevée. Les échantillons peu ferruginisés (< 5 %) tendent à se colmater, tandis que les autres (> 5 %) se fissurent dès que le ressuyage est terminé (1 h 30). (fig. 11-2).

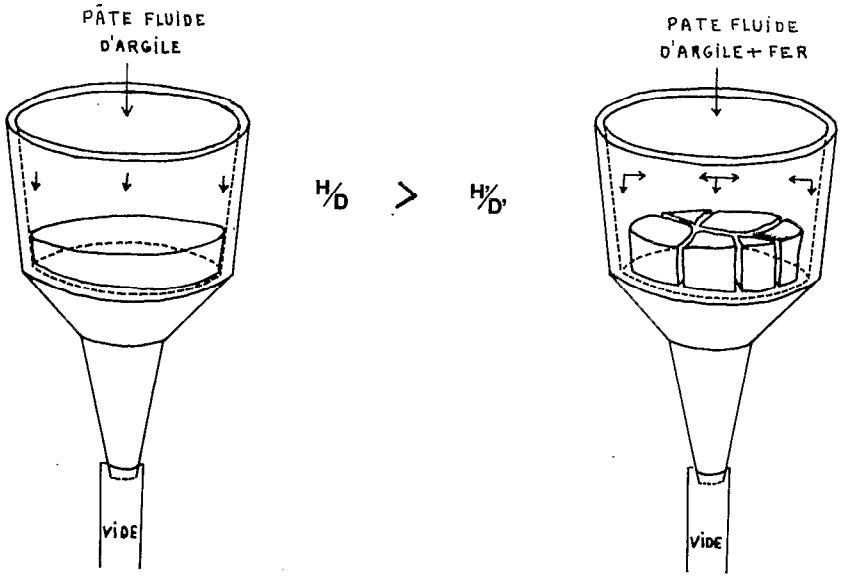


Fig. 11-2 - Ressuyage des galettes sur Büchner.

b) Etude de galettes.

α) Coloration de l'argile.

Elle se développe progressivement de façon presqu'imperceptible durant les 8 heures qui suivent l'adjonction de perchlorure ferrique.

Les références des couleurs observées en fin d'opération, sur les galettes d'argile sont indiquées dans le tableau 11-7. On constate que, dans les conditions adoptées, les galettes deviennent jaunes lorsque la teneur en Fe_2O_3 dépasse 4 %, se nuancent de rouge pour

Tableau 11-7

REFERENCES DES COULEURS DES ARGILES ENRICHIES EN Fe_2O_3 (Munsell Soil color Charts, 1954).

Fe_2O_3 %		coloration de galettes	
Total	Ajouté	à l'état humide	à l'état sec
2,17	0	10YR7/2	10YR8/1
2,67	0,50	10YR7/4	10YR8/3
4,03	1,86	10YR7/6	10YR7/4
5,40	3,23	7,5YR 7/6à 6/6	7,5YR7/4
7,86	5,69	5YR5/6	5YR5/6
10,32	8,15	5YR4/6	5YR5/6

des teneurs supérieures à 5 % et virent au rouge jaune au-delà de 7, 5 %.

b) Isotropie du retrait et orientation des particules.

Les mesures de l'épaisseur et du diamètre des galettes, à l'état humide puis à l'état sec, reportées dans le tableau 11-8, révèlent que le retrait est d'autant plus isotrope que l'échantillon est plus ferrugineux.

Tableau 11-8

VARIATIONS DE L'ISOTROPIE DU RETRAIT DE LA KAOLINITE EN FONCTION DE LA TENEUR EN Fe_2O_3 (KAOLINITE Ca)

	Témoin	Echantillons de kaolinite enrichie en Fe_2O_3				Fe_2O_3 croissant		
								Fe_2O_3 %
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
e/eo	0, 574	0, 586	0, 559		0, 623		0, 669		0, 696
d/do	0, 809	0, 809	0, 810		0, 787		0, 760		0, 753
$A = \frac{e/eo}{d/do}$	0, 709	0, 724	0, 690		0, 791		0, 880		0, 924
	VARIATIONS FAIBLES DES PARAMETRES RETRAIT ANISOTROPE				VARIATIONS MOINDRES DE L'EPAISSEUR PAR RAPPORT A CELLES DU DIAMETRE. ISOTROPIE CROISSANTE DU RETRAIT				

L'orientation des particules à l'état humide a été évaluée, comme précédemment, à partir des spectres de rayons X, selon la méthode proposée par TESSIER (1975) (cf. chapitre 11, 1). Les densités optiques des films (Pl. photo), mesurées sur un demi-anneau par des traversées successives, sont reportées sur la figure 11-3, tandis que les indices d'orientation qui en sont déduits figurent dans le tableau 11-9. Ces résultats révèlent que l'orientation est d'autant moins bonne que l'échantillon est plus ferrugineux.

Ceci a pu être vérifié grâce aux observations faites sous microscope électronique à balayage. On sait en effet que la kaolinite Ca, qui sert de

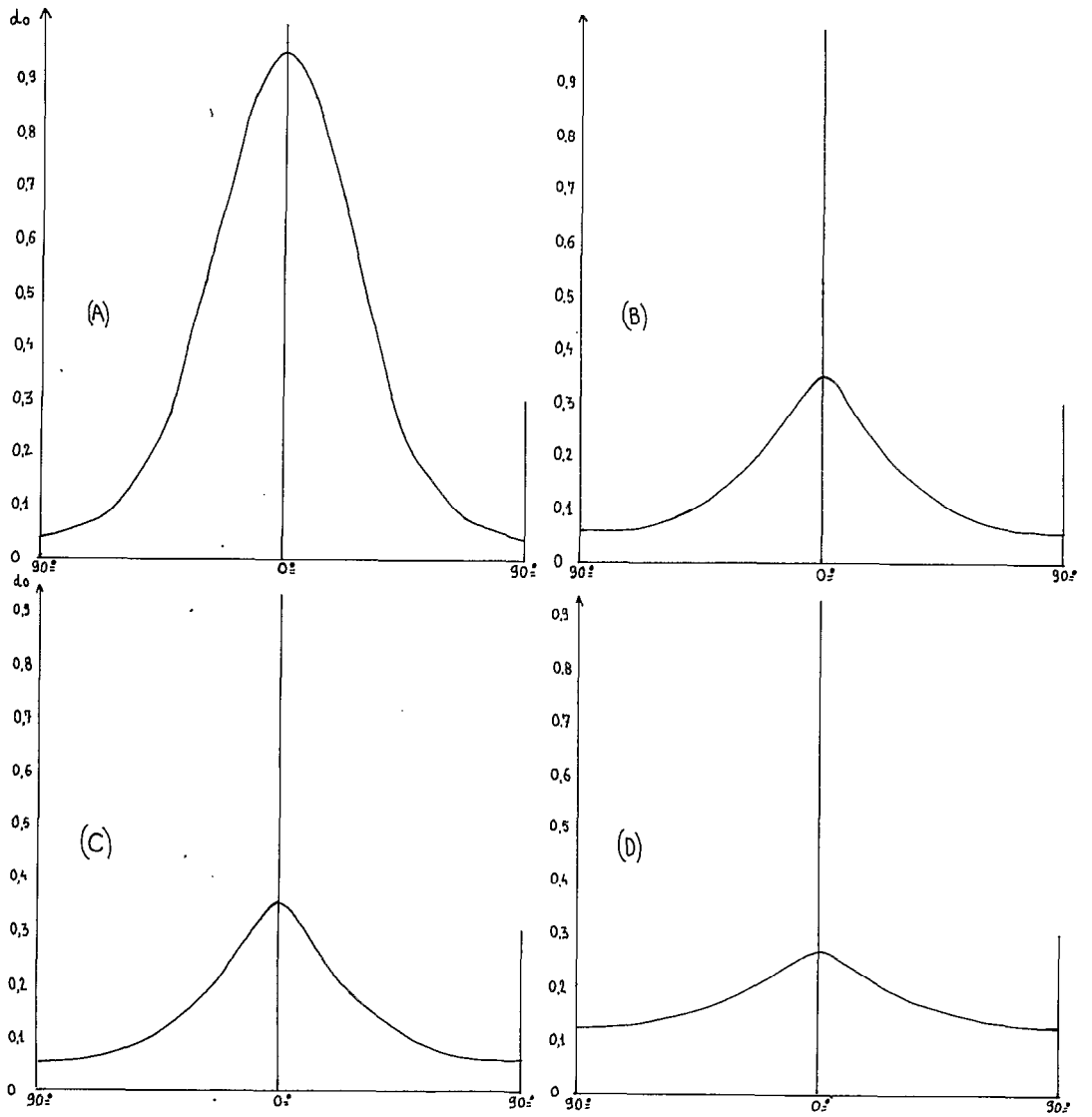


Fig. 11-3. Spectres de rayons X réalisés sur les galettes de kaolinite plus ou moins enrichies en fer.

(A) - 2,67 % de Fe_2O_3 R 20
(B) - 5,40 % de Fe_2O_3 R = 5,8
(C) - 7,86 % de Fe_2O_3 R = 4,0
(D) -10,32 % de Fe_2O_3 R = 2.

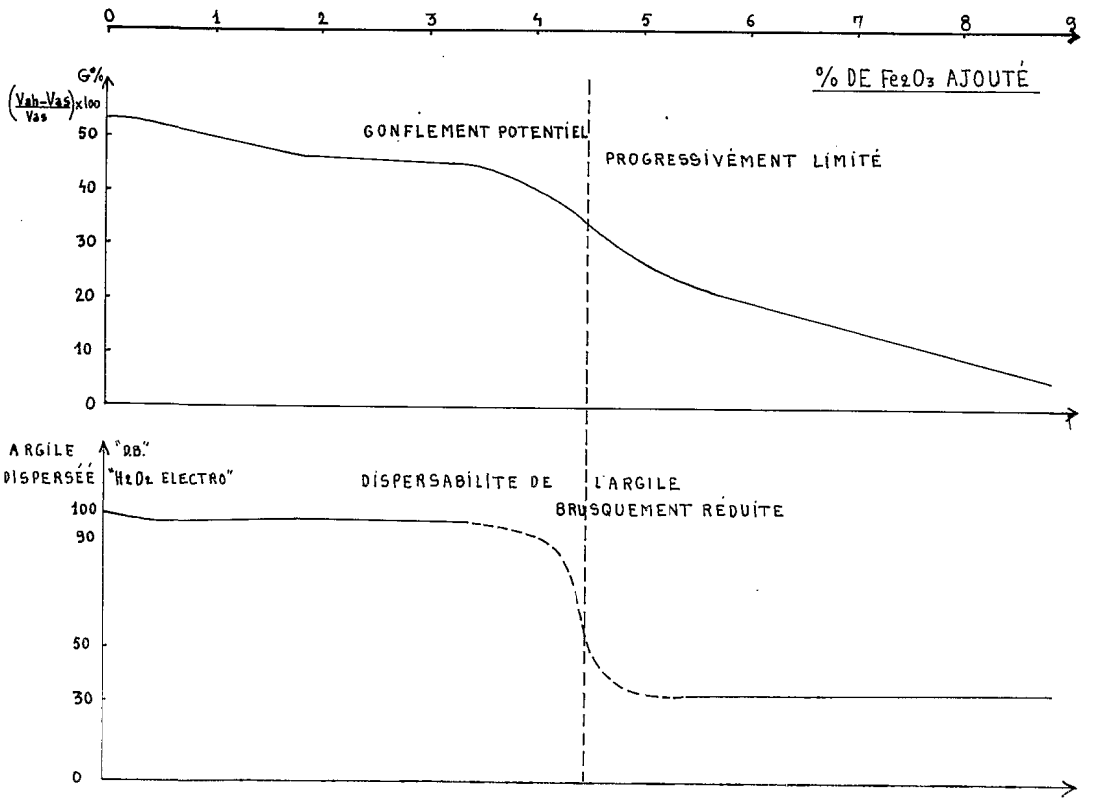


Fig. 11-4 - Gonflement potentiel et dispersabilité des agrégats artificiels.

Tableau 11-9

RELATION ENTRE LES TENEURS EN FER ET L'INDICE D'ORIENTATION (KAOLINITE Ca)

Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Ajouté	R
2,17	0	15,5
2,67	0,50	20
4,03	1,86	1,2
5,40	3,23	5,8
7,86	5,69	4,0
10,32	8,15	2,0

référence, est typiquement orientée (cf. TESSIER, 1975) (Planche , Photo). L'orientation est déjà beaucoup moins bonne avec une teneur en Fe_2O_3 de 5 % (Planche , Photo). A partir de 8 % de Fe_2O_3, l'échantillon obtenu est complètement isotrope ce qui est dû à la formation d'assemblages tridimensionnels : il apparaît en effet des sortes de "cages" ou de "nids d'abeilles" résultant de la mise en volume d'association : Bord-Face entre les cristallites de kaolinite.

A ces modes d'association fondamentalement différents, correspondent nécessairement des comportements physiques particuliers qu'il convient maintenant d'étudier.

c) Analyse de la réactivité des agrégats artificiels : gonflement potentiel et dispersion.

Les mesures de volume spécifique apparent et l'appréciation du gonflement potentiel qui en est déduite figurent dans le tableau 11-10.

Au fur et à mesure de l'adjonction de fer, le gonflement potentiel diminue, et ceci est particulièrement net dès que la teneur en fer dépasse 5 %.

Tableau 11-10

VOLUME SPECIFIQUE APPARENT ET GONFLEMENT POTENTIEL DES AGREGATS ARTIFICIELS (KAOLINITE Ca).

Fe_2O_3		V		Gonflement Potentiel %
Total	Ajoutés	Sec	Humide	
2,17	0	0,622	0,956	53,7
2,67	0,50	0,664	1,012	52,4
4,03	1,86	0,692	1,012	46,2
5,40	3,23	0,698	1,017	45,7
7,86	5,69	0,715	0,865	21,0
10,32	8,15	0,775	0,845	9,0

On retrouve d'ailleurs cette rupture, encore mieux marquée lorsque l'on teste la dispersabilité de l'argile des échantillons préparés. Les résultats d'une analyse granulométrique effectuée dans les conditions standard (KCl - dispersion NH_4OH à pH 9,5); regroupés dans le tableau 11-11, indiquent en effet que l'aptitude à la dispersion reste bonne en-dessous de 5 % de Fe_2O_3, mais que, en revanche, elle tombe brutalement pour des teneurs en Fe_2O_3 inférieures à 5 % (fig. 2). D'autres essais, effectués à titre de complément ont montré alors que les échantillons les plus ferruginisés étaient toutefois dispersés en milieu acide. Tout se passe donc comme si, dans cette expérience, au-dessus de 5 % (fig. 11-3), l'argile électronégative changeait de signe et devenait un colloïde électro-positif. Or, c'est là un comportement classique résultant d'un effet de "colloïde protecteur" et qui correspondrait, dans ce cas à la fixation de fer sous forme de micelles d'hydrate ferrique électro-positif. Mais, comme on a pu s'en rendre compte, il faut dans ces conditions une assez forte teneur en fer pour provoquer la formation d'assemblages tridimensionnels stables, volumineux et peu réactifs vis-à-vis des phénomènes de gonflement hydrique.

Le traitement "TAMM obscurité" appliqué aux agrégats enrichis en

Tableau 11-11

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES AGREGATS ARTIFICIELS

(KAOLINITE Ca)

Fe_2O_3		GRANULOMETRIE			
Total	Ajouté	A % (< 2 µ)	L. F. % (2 - 20 µ)	L. G. % (20 - 50 µ)	S. F. % (50 - 200 µ)
2,17	0	100	0	0	0
2,67	0,50	96,6	2,1	1,3	0
4,03	1,86	97,5	1,8	0,7	0
5,40	3,23	96,6	1,7	1,7	0
7,86	5,69	32,5	12,1	32,1	23,3
10,32	8,17	33,5	13,2	29,4	29,9

fer a pour effet :

- d'extraire une quantité de fer sensiblement identique à celle qui a été ajoutée lors de la préparation des agrégats (8,09 % de Fe_2O_3 extrait pour 8,15 % ajouté dans l'échantillon le plus fortement enrichi). Ceci montre que les composés ferriques formés sont maintenus sous une forme vulnérable à l'action de traitements complexants peu agressifs, différente de celle des composés initialement contenus dans la kaolinite de Provins,

- de provoquer la dispersion totale de l'argile lors du traitement "D. B. H_2O_2 electro" appliqué ultérieurement. Ce sont donc bien ces formes du fer, facilement extractibles, qui sont seules responsables de l'immobilisation des particules.

3/ - Etude de la ferruginisation de la kaolinite H.

La kaolinite Ca utilisée dans l'essai précédent est traitée par une solution H Cl N/10 pendant une nuit (pH = 1,7) puis lavée avant que ne lui soit ajoutée une solution de perchlorure de fer correspondant à une teneur en Fe_2O_3 de l'échantillon égale à 1 %. Le contact est alors maintenu pendant

8 heures. Cela étant réalisé, l'argile est séparée par centrifugation, lavée, puis essorée sur Büchner. Les différentes déterminations et observations effectuées alors sur les galettes ont conduit aux résultats reportés dans le tableau 11-12.

On remarque ainsi que la kaolinite H qui sert de référence est déjà très désorientée par rapport à la kaolinite Ca (cf. tableaux 11-8 et 11-9) et qu'il suffit alors d'une très petite quantité de fer pour obtenir une organisation particulièrement isotrope. L'observation au microscope électronique à balayage (photo) confirme d'ailleurs le type d'arrangement tridimensionnel engendré.

Tableau 11-12

DEGRE D'ORIENTATION ET APTITUDE AU GONFLEMENT (KAOLINITE H)

Fe_2O_3 ajouté %	DEGRE D'ORIENTATION		GONFLEMENT POTENTIEL %
	A *	R **	
0 Témoin Kaolinite H	0,817	2,8	48,9
1	0,989	1,3	36,5

* Isotropie du retrait

** Indice d'orientation.

Ainsi, par comparaison avec l'expérience précédente, cet essai montre qu'il est encore possible d'obtenir une organisation isotrope par adjonction d'une très petite quantité de fer. Il en résulte que deux éléments semblent jouer un rôle important dans l'arrangement des matériaux et leur comportement :

- d'une part l'état des kaolinites de départ, c'est-à-dire si elles sont H ou Ca, et ceci confirme les travaux de FRIPIAT et GASTUCHE (1952),

- d'autre part l'état sous lequel se fixe le fer sur la particule argileuse.

Il est vraisemblable que des phénomènes comparables interviennent sur l'argile contenue dans les matériaux pédologiques. Afin de vérifier cette possibilité, nous avons effectué une autre manipulation sur des agrégats de sol beige.

III - ETUDE DE L'ACTION DES SOLUTIONS FERRIQUES SUR LE COMPORTEMENT D'UN ECHANTILLON DE SOL BEIGE ; PROBLEME DE LA FERRISATION DE LA KAOLINITE DU SOL.

On sait déjà que les composés hydroxylés ferriques, même à faible concentration, sont considérés comme un des plus redoutables "poisons" des échangeurs d'ions*. Aussi peut-on se demander si de tels ions sont susceptibles de limiter la capacité d'échange d'un sol beige et d'en modifier le comportement physique. C'est pour répondre à cette question qu'a été entreprise l'expérience suivante.

a) Protocole expérimental.

L'objectif était au départ double puisqu'il s'agissait :

- de renouveler le contact entre des solutions de perchlorures ferriques fraîches, très diluées, en cours d'hydrolyse (dans lesquelles se forment les ions hydroxo) et la kaolinite du sol beige,
- et de suivre l'évolution de la fixation du fer et de la libération des bases échangeables.

Aussi, il a été jugé opportun d'opérer dans des colonnes emplies par 100 grammes d'agrégats de sol beige (obtenus par forçage à la main à

---

* Les indications sur le rôle exercé par les composés hydroxylés ferriques vis-à-vis des échangeurs d'ions nous ont été données par MM. PETIT et JULIEN, au laboratoire de chimie macro-moléculaire appliquée du C.N.R.S. C'est lors de la conversation que nous avons eue avec ces chercheurs qu'a été prévue cette expérimentation. Nous les remercions vivement pour les conseils qu'ils ont bien voulu nous donner.

travers un tamis à mailles carrées de 2 mm).

Afin d'apprécier la signification des quantités de bases échangeables (Ca et Mg) entraînées, par comparaison à celles obtenues dans des conditions équivalentes par une solution d'acide chlorhydrique, deux séries de colonnes ont été soumises à des percolations journalières (par H Cl et par $Fe\ Cl_3$) de 50 ml/jour durant 10 jours.

Les concentrations en perchlorure ferriques, comprises entre 0,001 M et 0,05 M correspondent à des pH qui varient de 3,1 à 1,95.

Chaque solution percolée a été analysée : les teneurs en fer, comparées à celles de la solution initiale, indiquent par différence les quantités de fer fixées, tandis que les dosages de Ca et Mg révèlent le déplacedes bases échangeables.*

En fin d'opération, des lavages à l'eau éliminent le reliquat de chlorures. Les agrégats sont ensuite séchés à l'air libre et analysés :

- les taux de fer échangeables sont dosés dans l'extrait : K Cl + hydroquinone (RATSIMBAZAFY, 1971) après avoir contrôlé que l'entraînement par l'eau (à l'état de chlorure) était quasiment nul,
- les capacités d'échanges sont évaluées,
- les volumes spécifiques apparents à l'état sec et à l'état humide, servant de base au calcul du gonflement potentiel sont mesurées dans les conditions habituelles.

Tous ces résultats sont comparés à ceux qui caractérisent l'échantillon initial dont la capacité d'échange est de 4 milliéquivalents pour 100 grammes, les bases échangeables étant principalement Ca^{++} (2,20 meq/100 g) et Mg^{++} (0,63 meq/100 g) et le taux de saturation égal à 71,8 %.

b) Les résultats.

α) Les principales données obtenues par l'analyse chimique ont été regroupées dans le tableau 11-13.

---

* Ces dosages ont été effectués par spectrophotométrie d'absorption atomique au laboratoire de spectrographie de l'O.R.S.T.O.M. sous la direction de M. PINTA.

Tableau 11-13

FIXATION DU FER ET MODIFICATION DU COMPLEXE ABSORBANT DU SOL BEIGE.

Percolation par	pH de la solution	Analyse de Fe_2O_3 en sol (en mg/100 g de sol)			Fer "échangeable"		Ca + Mg entraîné	Capacité d'échange	
		percolé	retenu	taux de fixation	en mg Fe_2O_3/100 g	en meq Fe^{+++}/100g	(mg/100g)	valeur	diminution
(Témoin) non percolé								4, 0	
Perchlorure 0, 001 M	3, 1	26, 6	25, 5	96 %	9, 7	0, 52	0, 41	3, 8	0, 2
" 0, 001 M renouvelé 5 fois	3, 1	133, 0	103, 4	78 %	18, 1	0, 97	0, 75	3, 6	0, 4
" 0, 003 M	2, 70	87, 1	66, 0	76 %	-	-		3, 7	0, 3
" 0, 01 M	2, 35	266, 6	101, 3	38 %	-	-		3, 7	0, 3
" 0, 05 M	1, 95	1,348	212, 4	15, 8 %	26, 1	1, 4	0, 90	3, 6	0, 4
H Cl 0, 001 M	3						0, 14		

Il ressort de leur examen que :

1) La fixation du fer se produit dans tous les échantillons, mais elle n'est presque totale qu'en présence de très faibles concentrations, à un pH voisin de 3. Une fraction importante du fer fixé (9, 7/25, 5) se trouve alors sous une forme facilement déplaçable par un réactif d'échange (K Cl) en présence d'hydroquinone. Si le taux de fixation diminue lorsque le même traitement est renouvelé 5 fois, ce dernier aboutit cependant à la fixation d'une quantité appréciable de fer, à partir de solutions très diluées. Quant aux concentrations supérieures à 0, 01 M, elles ne permettent pas de fixer des quantités beaucoup plus importantes de fer. De toute façon, la quantité de fer fixée reste donc toujours faible (de l'ordre de 0, 1 à 0, 2 % de Fe_2O_3).

2) Les quantités de fer déplaçables par K Cl en présence d'hydroquinone sont du même ordre de grandeur, quoi que plus importantes, que les quantités de bases échangeables Ca et Mg entraînées. Il se pourrait donc qu'il y ait effectivement déplacement des bases échangeables consécutif à la fixation d'ions ferriques sur les sites d'échange. Il est cependant difficile de faire un bilan, puisque le fer fixé ne se trouve pas, sous forme de Fe^{3+}, mais probablement sous celle de $Fe\,OH^{2+}$, $Fe\,(OH)_2^{+}$. La partie de ce fer qui reste momentanément échangeable est, selon toute vraisemblance, celle qui n'est pas polymérisée.

3) La capacité d'échange diminue faiblement dans tous les échantillons percolés par le chlorure ferrique. Les variations ne dépassent cependant pas 10 % en valeur relative et restent inférieures aux estimations du fer échangeable. La limitation de la capacité d'échange n'est donc pas ici nettement mise en évidence.

(6) Les mesures de volumes spécifiques apparents faites sur des lots d'agrégats ont donné des résultats peu reproductibles du fait de l'hétérogénéité du matériau initial et de sa transformation par le traitement. Il a donc été nécessaire de renouveler les mesures plusieurs fois afin d'éliminer les données aberrantes.

L'effet du traitement sur les volumes spécifiques apparent semble être complexe. Mais les variations décelées correspondent toutes globale-

Tableau 11-14

FIXATION DU FER ET MODIFICATION DU RETRAIT POTENTIEL.

Percolation par	Quantités de fer retenu (en % du sol)	Volume spécifique apparent à l'état humide	Volume spécifique apparent à l'état sec	Retrait potentiel %
Témoin non percolé	0	0, 658	0, 606	8, 6
Perchlorure 0, 001 M	0, 02	0, 685	0, 641	6, 8
" 0, 001 M renouvelé 5 fois	0, 1	0, 676	0, 641	5, 5
" 0, 003 M	0, 07	0, 667	0, 637	4, 7
" 0, 01 M	0, 1	0, 625	0, 621	0, 6
" 0, 05 M	0, 2	0, 610	0, 613	0

ment à une limitation des possibilités de retrait (et probablement de gonflement), consécutive à la fixation de petites quantités de fer.

Ce résultat apparaît plus probant que ceux fournis par les évaluations de la capacité d'échange. La limitation des possibilités d'hydratation des surfaces (lors de l'humectation sous vide) et par suite celle du retrait, serait ainsi la conséquence la plus évidente de la fixation d'une petite quantité de fer par la kaolinite des échantillons de sol beige (ferrisation).

Conclusions.

L'ensemble des résultats obtenus relatifs au "masquage" de l'argile nous renseigne sur les processus possibles de la formation des micronodules.

1) Le "masquage" est dû à la fixation* de petites quantités de fer sur les positions superficielles d'échange qui aboutit à une diminution de la capacité d'échange et donc à une réduction des possibilités de dispersion.

2) L'argile Fe devient électropositive. Il en résulte un comportement colloïdal spécifique** et la formation d'assemblages Bord-Face, qui forment des unités tridimensionnelles, dans lesquels les particules ne sont pas orientées (formation d'un plasma isotrope).

---

* Cette fixation a été étudiée par de nombreux auteurs :
- BERG (1960) provoque le blocage d'une partie de la capacité d'échange de la kaolinite par fixation de fer.
- THOMAS et COLEMAN (1964) constatent que les ions Fe^{3+} en position d'échange sont instables et s'hydrolysent, donnant naissance à des ions H^+ qui pénètrent dans le réseau, ce qui provoque l'apparition d'ions Al^{3+} et la réduction de la capacité d'échange effective, en même temps que le développement d'hydrates ferriques plus ou moins liés aux feuillets.
- PETRUSHENKO et MASLENKOVA (1972) signalent également l'effet important exercé par la fixation de faibles quantités de fer, manifesté par la formation d'assemblages de particules (ou floc) dont les dimensions sont de l'ordre de la centaine de microns, et par une diminution du potentiel électrocinétique (qui de 5,85 mv dans la kaolinite initiale, s'abaisse à 3,82 mv après addition de fer).
- FORDHAM (1969 - 1973) précise que le fer n'est pas seulement lié par des forces électrostatiques et que la réaction est partiellement reversible.

** TOWSEND et REED (1971) indiquent que le comportement des latosols de Panama est dominé par la présence de constituants amorphes, et en particulier par celle des hydrates ferriques, tandis que VAN RAIJ et PEECH (1972) étudient plus spécifiquement les propriétés électrochimiques particulières aux oxisols et aux alfisols de la zone tropicale.

3) L'ensemble constitue un système "figé"* , dont l'aptitude au gonflement est limitée. Sa cohésion, même lorsqu'elle est relativement faible, n'est alors pas fortement diminuée lors de l'humectation ; elle suffit, de ce fait, à assurer la stabilité des assemblages.

A l'inverse, la dissociation des assemblages isotropes du sol rouge (ou démicronodulation) résulterait :

- de la "deferrisation", responsable d'un accroissement des charges négatives,
- de l'accroissement des possibilités de gonflement et de dispersion qui en découle,
- par voie de conséquence, de l'élargissement de la structure et de la transformation du système poreux (manifestée en particulier dans l'horizon "de comportement") génératrices de processus d'hydromorphie secondaire.

B - ETUDES PRELIMINAIRES SUR LE FONCTIONNEMENT DE SYSTEMES RECONSTITUES EN COLONNES, A PARTIR D'AGREGATS DE SOL ROUGE, SOUMIS A DES PERCOLATIONS DANS DES CONDITIONS PHYSIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES VARIEES.

L'objectif est ici de faire appel à des moyens artificiels aptes à changer la structure pour étudier, par des voies expérimentales, les variations de fonctionnement des matériaux pédologiques, liées aux modifications physiques et physico-chimiques.

Afin que les résultats soient décelables, dans un laps de temps limité à quelques semaines, il convenait de faire appel à des traitements relativement efficaces, plus agressifs que les agents qui interviennent dans le milieu naturel. Il s'agira ici principalement :

- du réactif de Tamm dont l'effet sur la dissociation des micronodules rouges est déjà connu,

---

*KUBIENA (1936) puis LARUELLE (1956 - 1965) ont insisté sur cette immobilisation des constituants argileux qui se développe dans des sols tropicaux, en même temps que la coloration rouge (lateritische roterde)

- de solutions oxaliques plus ou moins concentrées (qui introduisent une gradation dans l'énergie du traitement),
- de solutions sodiques dispersantes,
- d'actions physiques telles que la dessiccation et la percolation par l'eau.

Outre le matériau rouge, caractérisé par une organisation à plusieurs niveaux dans laquelle l'argile est partiellement "bloquée", on utilisera, à titre de référence, un matériau beige, à organisation simple (à un niveau), gonflant en présence d'eau, et dont l'humectation modifie fortement la cohésion.

Choix des modalités expérimentales.

Les percolations sont faites dans des colonnes courtes (longueur 16 cm) identiques à celles préconisées pour la détermination de l'indice K dans la caractérisation de la stabilité structurale.

On les remplit par les matériaux choisis et on verse dessus, quotidiennement, au goutte à goutte, 50 cm^3 de solutions contenant différents réactifs.

On mesure alors : - la quantité d'argile emportée dans les solutions percolées
- le temps de passage de la première goutte,
- le temps de passage des 50 cm^3

Des observations microscopiques et des analyses granulométriques sont faites ultérieurement sur les colonnes de terres modifiées par les traitements.

Trois séries d'expériences ont été réalisées :

- les premières mettent surtout en évidence l'effet de la dissociation sur le fonctionnement en présence d'une porosité grossière très forte,
- les secondes font intervenir la progressivité de la dissociation et le rôle de la dispersion,
- les troisièmes, enfin, révèlent surtout les conséquences possibles de la dessiccation.

On présentera brièvement ces essais avant de tenter de récapituler les résultats obtenus.

I - PREMIERE SERIE D'EXPERIENCES : DISSOCIATION ET FONCTIONNEMENT. *

Trois réactifs sont employés :

- l'eau qui est peu active sur la dissociation du matériau micronodulaire rouge,
- le réactif de Tamm, qui, à l'inverse, libère rapidement l'argile 'bloquée",
- l'acide oxalique (N/2. 500, pH 4) dont l'effet est intermédiaire.

Les matériaux rouge et beige ont été tous les deux utilisés dans ce cas,

- soit seuls : les colonnes étant remplies de 50 grammes d'agrégats de 1 à 2 mm de diamètre;
- soit mélangés d'un poids équivalent de sable quartzeux destiné à constituer une charpente rigide, apte à maintenir la porosité grossière. Il s'agit ici de quartz de Norvège, grossier ($\varnothing$ =2 à 4 mm) très déchiqueté.

On crée ainsi un assemblage intertextique comportant des vides de très grandes dimensions (et une porosité totale voisine de 50%).

Au total, 12 colonnes ont été ainsi préparées.

Résultats. Deux cas doivent être distingués en fonction de l'importance de la charpente.

1/ - En présence d'une armature de sables grossiers quartzeux.

Les quantités de réactif ayant percolé et les poids d'argile exportée sont indiqués dans le tableau 11.15.

Tableau 11-15

VOLUME TOTAL DE SOLUTIONS AYANT PERCOLE (en cm^3) (a) ET POIDS DES PRODUITS ENTRAINES DURANT L'EXPERIENCE (en °/$_{oo}$ DU MATERIAU CONTENU DANS LES COLONNES) (b)

Matériaux utilisés	Macroporosité au départ	Réactifs		
		Eau	Acide oxalique	Tamm
matériau rouge + sable quartzeux	52 % a	300	300	300
	b	1,3	2,2	33,2
matériau beige + sable quartzeux	49 % a	300	300	300
	b	2,3	1,1	2,1

* Ces premiers travaux ont donné lieu à la rédaction d'une note (PEDRO - CHAUVEL, 1973).

Ces résultats suscitent les remarques suivantes :

- Dans tous les cas la percolation a eu lieu totalement (300 cm^3)
- Sur le matériau rouge :

  . l'eau n'exerce qu'un très faible effet (la porosité est telle - ment large que quelques micronodules sont passés),

  . l'acide oxalique dilué provoque une légère dispersion de l'argile qui est entraînée,

  . le réactif de Tamm est responsable d'une dissociation ra- pide des micronodules, en sorte que les particules libérées sont évacuées aisément à travers les vides grossiers de l'assemblage.

Il se produit ainsi, en quelque sorte, un "vidage" de l'argile, qui va de pair avec le développement de chenaux qui accroissent encore les possibilités de percolation.

- Sur le matériau beige, la quantité d'argile entraînée par le réactif de Tamm est moindre en raison du colmatage de certains vides par les produits de désagrégation.

2/ - En l'absence d'une armature de sables grossiers quartzeux.

Les résultats des mesures sont rassemblés dans le tableau 11 - 16.

Tableau 11-16

VOLUME TOTAL DE SOLUTION AYANT PERCOLE (en cm^3) (a) ET POIDS DES ELEMENTS ENTRAINES DURANT L'EXPERIENCE (en °/₀₀ DU MATERIAU CONTENU DANS LES COLONNES) (b).

Matériaux utilisés	Macroporosité au départ (6)		Réactifs		
			Eau	Acide oxalique	Tamm
Matériau rouge	39%	a	300	300	150
		b	0,35	0,90	0,20
Matériau beige	35%	a	300	300	50
		b	1,20	0,90	0,15

Il apparaît :

- que le réactif de Tamm exerce une forte action de destructuration, puisque l'imperméabilisation apparaît dès le 1er jour pour le maté- riau beige (50 cm^3 percolés) et à partir du 3è pour le matériau rouge ge (150 cm^3 percolés).
- que dans ce cas, l'évacuation est pratiquement nulle et l'évolution

aboutit à un "colmatage" généralisé.

Cette première série d'expériences fait déjà apparaître deux conclusions :

- si l'évolution du matériau conduit à une diminution de la macroporosité, il se produit un "colmatage",
- si, à l'inverse, la dissociation va de pair avec le maintien des vides grossiers, il peut se produire un "vidage" rapide, sans que soit intervenue, dans ce cas, la dispersion préalable de l'argile.

Le processus de lessivage, qui se situerait entre ces deux extrêmes, nécessite probablement une dispersion progressive qui ne peut être mise en évidence que par des traitements plus ménagés.

II - DEUXIEME SERIE D'EXPERIENCES : INTERVENTION DE LA DISPERSION.

Cette série comprend, en fait, deux manipulations successives qui ont été réalisées en collaboration avec Madame VERRET (1973).

Au cours de la première manipulation :

- on a ajouté aux réactifs utilisés précédemment une solution oxalique N/10
- mais surtout on a cherché à réaliser une porosité mieux définie, à l'aide de billes de verre calibrées à 2 mm, réalisant ainsi un assemblage de billes jointives (84 % de billes) dont les interstices étaient remplis de micronodules rouges ou de petits agrégats de matériau beige (ϕ = 125 à 500 μ).

Au total 8 tubes ont été préparés de cette façon avec des billes et 8 autres sans billes.

Résultats.

Il est apparu :

1°/ que l'eau et l'acide oxalique très dilué ne provoquent, dans ce cas, ni évolution ni lessivage

2°/ que le réactif de Tamm et l'acide oxalique N/10 sont à l'inverse actifs, mais que leurs effets sont, là encore, dépendants de la présence d'une charpente.

- dans le matériau dépourvu de bille, le colmatage se réalise en effet dès le 1er jour.

- dans celui dont la porosité est maintenue au sein d'un assemblage de billes jointives, la percolation se poursuit pendant 6 jours sans que n'intervienne aucun lessivage; et c'est seulement lorsque de l'eau est substituée aux réactifs, pendant les 3 jours suivants, que se produit un entraînement.

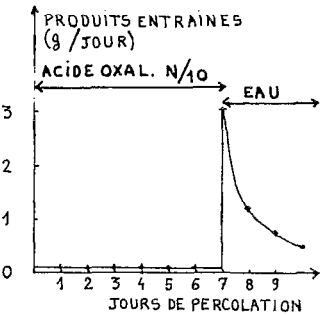


Fig. 11-5. Entraînement d'argile à partir d'une colonne de sol rouge (16 %) + billes (84 %) percolée par l'acide oxalique (6 jours) puis par l'eau.

On constate ainsi que, dès que la porosité n'est plus anormalement élevée, seul le lavage par l'eau révèle pleinement l'influence exercée par les réactifs, l'entraînement se produisant alors sous une forme dispersée.

Deux phases successives apparaissent ainsi nécessaires à l'exportation d'argile :

- une de préparation qui dissocie le matériel et libère l'argile, dans ce cas floculée du fait de la concentration en électrolyte.
- une d'évacuation durant laquelle se produit la dispersion lorsque le réactif est dilué par l'eau circulante.

Ainsi se manifeste une discontinuité dans le phénomène de lessivage, conformément à ce qui avait déjà été pressenti lors des études réalisées sur les cases lysimétriques de Bambey (CHAUVEL et CHARREAU, 1972).

Dans la deuxième manipulation, le matériau rouge seul est employé sous la forme d'agrégats grossiers (Φ = 1 à 3 mm).

De plus, les concentrations des réactifs sont diversifiées et échelonnées de la façon suivante :N/2. 500, N/1. 000, N/500, N/100 et N/10 (l'emploi d'oxalate d'ammonium permettant alors de tamponner toutes les solutions à un pH proche de 3, 5).

Résultats.

Comme précédemment, il est apparu que les percolations répétées par les réactifs (quels qu'ils soient) ne provoquent aucun entraînement et que seul leur remplacement par l'eau, alterné avec l'emploi des solutions oxaliques, déclenche une exportation d'argile comme cela est indiqué sur la figure 11.5.

Ceci confirme bien le rôle exercé par la dilution sur la mise en dispersion.

Les variations du fonctionnement, ainsi que les quantités de produits entraînés sont indiquées sur le tableau 11.17.

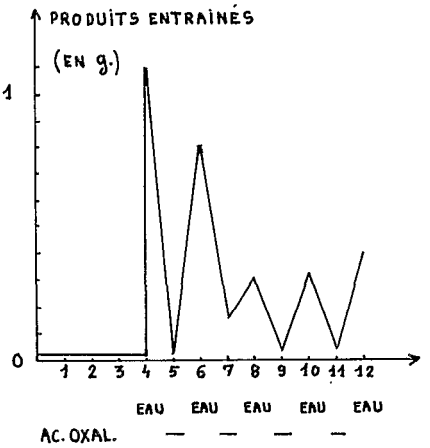


Fig. 11-6. Entraînement d'argile à partir d'une colonne de sol rouge percolée alternativement par la solution oxalique et par l'eau.

Tableau 11 - 17

EVOLUTION DU FONCTIONNEMENT DES COLONNES, POIDS DES PRODUITS ENTRAINES ET QUANTITES D'ARGILE SPONTANEMENT DISPERSABLE A PARTIR DES MATERIAUX PERCOLES.

Réactifs oxaliques	N/2.500	N/1.000	N/500	N/100	N/10
évolution du fonctionnement	percolations régulières et totales			colmatage	"vidage" accidentel
produits entraînés %	0,05	0,04	1,8	-	(6,4)
taux d'argile spontanément dispersable dans les matériaux percolés.	1,4	2,8	7,7	67,8	91

Afin de savoir si les produits évacués représentent tout ou partie de la fraction fine dissociée, les taux d'argile spontanément dispersable dans un litre d'eau ont été évalués par prélèvement à la pipette, en fin de manipulation, sur les matériaux précédemment percolés.

La seule comparaison des résultats obtenus (reproduits dans le tableau 11 -17) avec les quantités de matière entraînées, révèle que la dissociation ne constitue pas ici un facteur limitant et que c'est bien, en fait, la possibilité de dispersion qui commande, dans ce cas, l'évolution du lessivage.

En conclusion, l'expérience révèle que deux processus semblent intervenir ici :

- la dissociation de l'argile, d'autant plus forte que la concentration du réactif est plus élevée : elle libère les particules mais, au-delà d'un certain seuil, provoque aussi l'obstruction des pores, c'est-à-dire le "colmatage";
- la dispersion qui à l'inverse augmente avec la dilution : elle conditionne le transport des particules entraînées.

Le moyen terme le plus favorable à l'exportation d'argile serait, dans cette expérience, réalisé pour une concentration de l'ordre de N/500, qui correspondrait ainsi à une position d'équilibre.

III - TROISIEME SERIE D'EXPERIENCES : ROLE DE LA DESSICCATION.

Ces dernières manipulations, réalisées par Mademoiselle BERRIER, mettent plus particulièrement l'accent sur la dynamique du phénomène.

- Le réactif, utilisé quotidiennement durant une semaine, est une solution sodique (NaOH dilué à pH 9, 5, puis solution tampon Na_2CO_3 M - Na H CO_3 à pH 9, 5) destinée à faciliter ultérieurement la dispersion lorsque les percolations sont poursuivies avec de l'eau pure (ces dernières seules étant appliquées dans le traitement témoin)
- Les matériaux rouges (et beiges) sous forme de petits agragats sont employés seuls, ou mélangés à 50 à 75% de billes.
- Les percolations par l'eau sont interrompues plusieurs fois, d'abord durant de brèves périodes de temps (48 heures), puis pendant toute une semaine au cours de laquelle on procède à un séchage à l'étuve (45°).

Résultats.

Les résultats obtenus, dont certains sont reproduits dans le tableau 11 - 8 ou encore représentés graphiquement (fig. 11.6) font apparaître les faits suivants :

- la solution sodique, pas plus que l'eau pure, ne provoque une évacuation d'argile, mais c'est seulement la succession des 2 traitements qui est active dans ce domaine, ce qui confirme l'allure discontinue du processus;
- seule la présence d'un squelette à grains jointifs (75 % de billes) intervient sur le fonctionnement des colonnes ;

- seule la présence d'un squelette à grains jointifs (75% de billes) intervient sur le fonctionnement des colonnes*;
- la comparaison des temps de passage de 50 cm^3 et des quantités de produits évacués montre que ces dernières sont d'autant plus fortes que l'écoulement est plus rapide.
- des arrêts de percolation ont précisément pour effet d'accélérer ultérieurement la circulation d'eau et d'accroître les exportations d'argile, de façon particulièrement marquée après une semaine de dessiccation.

conditions expérimentales	temps de passage de 50 cm^3	quantités d'argile entraînées (mg)
addition quotidienne	23 H	16 mg
après arrêt de 48 heures	3 H 30	28 mg
après dessiccation à l'étuve(45°) durant une semaine	2H	145 mg

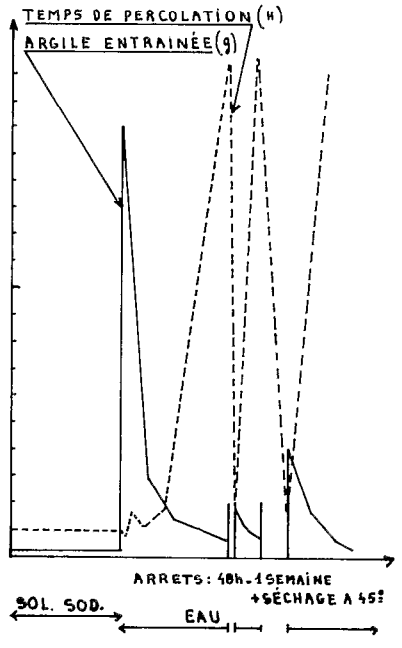


Fig. 11-7 Variations de l'entraînement par l'eau effet des arrêts de percolation et d'un séchage à l'étuve à 45°.

La dynamique du phénomène n'est plus dans ce cas influencée principalement par la concentration et par la nature des réactifs, mais bien plutôt par des actions de nature physique, telles que l'intervention d'une phase de dessiccation, qui jouent alors un rôle déterminant sur le rythme et sur l'importance des exportations d'argile.

* à l'inverse, la présence de 50% de billes n'exerce aucun effet sur le fonctionnement des colonnes.

Tableau 11-18

EFFET DE LA DESSICCATION SUR LE TEMPS DE PERCOLATION ET SUR LA QUANTITE D'ARGILE ENTRAINEE.

conditions expérimentales	temps de passage de 50cm^3	quantités d'argile entraînées(mg)
addition quotidienne	23 h	16 mg
après arrêt de 48 heures	3 h 30	28 mg
après dessiccation à l'étuve (45°) durant une semaine	2 h	145 mg

- la comparaison des temps de passage de 50 cm^3 et des quantités de produits évacués montre que ces dernières sont d'autant plus fortes que l'écoulement est plus rapide ;
- des arrêts de percolation ont précisément pour effet d'accélérer ultérieurement la circulation d'eau et d'accroître les exportations d'argile, de façon particulièrement marquée après une semaine de dessiccation.

La dynamique du phénomène n'est plus dans ce cas influencée principalement par la concentration et par la nature des réactifs, mais bien plutôt par des actions de nature physique, qui jouent alors un rôle déterminant sur le rythme et sur l'importance des exportations d'argiles.

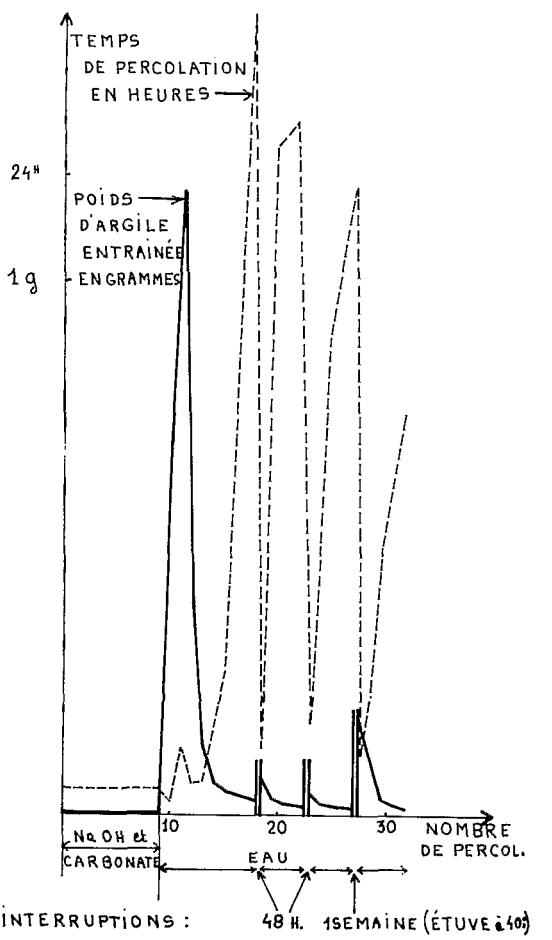


Fig. 11-8 – Variations du temps de percolation et du poids d'argile entraînée.

L'observation microscopique des échantillons de terre percolée complète ces résultats et révèle les faits suivants :

1°/ - La simple alternance d'humectation par l'eau distillée et de dessiccation (sans traitement préparatoire) conduit à une certaine dégradation des agrégats de sol rouge, manifestée par le développement de domaines anisotropes : des liserés jaunes orientés autour des agrégats et des séparations plasmiques.

2°/ - Les échantillons "colmatés" qui n'ont été le siège d'aucune exportation d'argile, sont les seuls à présenter des argilanes, formés au cours de l'expérimentation (puisqu'ils prennent appui sur des billes). Présentant des limites diffuses avec les micronodules, ils témoignent d'une réorganisation des matériaux argileux, responsable de l'obstruction des vides.

3°/ - Les colonnes dans lesquelles la stabilité de la charpente a permis à l'éluviation de se déclencher et de se poursuivre au cours des percolations par l'eau présentent une organisation comparable à celle des sols lessivés, caractérisée en particulier par l'accumulation de particules fines sur le sommet des billes, formant des "coiffes", assez comparables à celles observées par BOCQUIER (1971) dans les horizons A_2. Il existe donc une certaine convergence entre les processus provoqués "in vitro" et ceux qui interviennent dans la pédogénèse.

Deux conclusions essentielles ressortent des résultats de ces quelques expériences :

- L'argile bloquée dans les micronodules de sol rouge peut être libérée, non seulement par des réactifs chimiques, mais aussi par les contraintes physiques engendrées par la dessiccation.
- Selon la dynamique du phénomène, l'évolution pourrait alors s'orienter vers deux voies différentes :

. "colmatage" lorsque la dissociation est rapide et la capacité d'évacuation faible,

. "exportation continue d'argile" là où la libération et la dispersion des particules restent progressives et l'écoulement vertical de l'eau important en saison des pluies.

Quatrième Partie

INTERPRÉTATION D'ENSEMBLE

Chapitre 12

SYNTHÈSE MORPHOLOGIQUE
ET RÉALITÉ DES FILIATIONS PÉDOLOGIQUES EN MOYENNE CASAMANCE

INTRODUCTION.

L'analyse microscopique a mis en évidence l'existence de filiations entre les organisations caractéristiques des sols ; mais elle a aussi montré que les transformations essentielles se situaient au niveau de l'assemblage plasmique où elles se manifestent par des variations de la couleur, de l'opacité et de l'anisotropie optique, et/ou d'un autre côté elles sont capables de s'autocatalyser à partir des surfaces de discontinuité. Nous n'examinerons ici, que celles qui s'effectuent spontanément sous végétation forestière, sans intervention de l'homme.

Les essais réalisés au laboratoire ont permis de préciser la nature de ces transformations et indiqué que celles-ci affectent à la fois l'état d'association, la réactivité des constituants du plasma, et, localement, la concentration relative des hydrates ferriques.

Trois principaux types d'organisation, différents par leur assemblage plasmique, ont été ainsi reconnus, qui se succèdent dans les sols de Casamance :

- micronodules rouges isotropes, peu réactifs, dans lesquels kaolinite et hydrates ferriques se trouvent en proportions relativement constantes ;
- nodules rouge sombre à opaque, plus ou moins individualisés, cimentés, parfois enkystés et enrichis en produits ferrifères ;
- argile "libre", diversement colorée (rouge, beige, blanchâtre)

susceptible de gonfler en présence d'eau et d'être dispersée, à teneur variable en Fe_2O_3.

Le maintien de l'association du plasma et du squelette quartzeux et l'évolution de ce dernier dépendent de la nature de ces assemblages.

Ainsi le devenir des grains de quartz est-il directement lié à leur place dans l'organisation :

- inclus dans les micronodules qui forment l'armature du matériau, ils bougent peu et subissent simplement une lente dissolution qui affecte sélectivement les fractions les plus fines ;
- séquestrés dans les nodules, ils sont éclatés lorsque les incrustations formées dans leurs fissures sont nourries par les oxydes de fer issus de la disjonction des constituants du plasma situés à leur contact (argilanes zonés) ;
- enfin dispersés dans l'argile "libre", ils sont fragmentés après dissolution des ciments ferriques et redistribués là où interviennent des déplacements du plasma, que ceux-ci soient dus à des contraintes externes (d'origine biologique ou autre) ou à des actions de gonflement et de retrait ; ils peuvent alors s'accumuler de façon relative.

Notre objectif est maintenant de faire une sorte de bilan général d'ordre semi-quantitatif, des transformations observées, à partir des données fournies par l'analyse microscopique (chapitre 9) et de celles obtenues par les méthodes d'étude de l'organisation par voie analytique (chapitre 10).

Ce bilan sera effectué en considérant d'abord les seules organisations plasmiques, puis en envisageant, de façon plus globale, l'ensemble des constituants du squelette et du plasma et enfin en étudiant la dynamique générale du fer, qui s'avère être un des éléments essentiels du système.

Dans une seconde phase, on examinera alors, d'une part les relations entre les deux éléments constitutifs du plasma (fer-argile) et d'autre part celles relatives au système "plasma-squelette".

A - BILAN GENERAL DES TRANSFORMATIONS OBSERVEES DANS LES TOPOSEQUENCES : SOL ROUGE - SOL BEIGE.

1/ - Bilan des organisations plasmiques.

Une représentation schématique de ce bilan est proposée sur la figure 12-1.

L'importance volumique de chaque organisation (en % du volume occupé par le total du plasma dans le sol rouge), y est indiquée, de façon approximative par les valeurs portées en ordonnée, tandis que l'axe des abscisses correspond à la succession des sols au sein d'une "toposéquence théorique".

Il nous est apparu ainsi qu'à ce stade de l'étude, il devenait nécessaire de dépasser le cadre de la zone où sont associés sols rouges en voie de transformation et sols beiges de plateau. Plus au sud, en effet, sous un bioclimat humide de type guinéen, sont observés des sols rouges dont la structure micronodulaire reste dominante dans l'ensemble de l'horizon B 1 et qui ne présente pas alors les caractères de différenciation texturale et structurale que nous avons signalés dans les toposéquences étudiées.
Ces sols rouges, très homogènes représenteraient les orthotypes et seraient en fait, à l'origine de l'évolution étudiée ; dans ces conditions, les profils de sols rouges des toposéquences de la région de Séfa ne correspondraient qu'aux premiers stades de la transformation des horizons pédologiques qui conduit aux sols beiges.

a) Bilan des organisations plasmiques dans l'horizon B 1.

La dislocation de la structure micronodulaire dans l'horizon B 1 constitue précisément la première phase des transformations étudiées. Elle aboutit à la "fonte" de micronodules, progressivement "digérés" par le plasma du fond matriciel. Cette évolution va de pair d'une part avec un déplacement de plasma accumulé dans l'horizon sous-jacent sous forme d'argilanes rouges, d'autre part avec une "activation" des constituants argileux, tant dans le domaine physique (gonflement et retrait) que dans le domaine physico-chimique (capacité d'échange). Ainsi se différencie un horizon B 1 beaucoup plus réactif que les horizons profonds et que nous

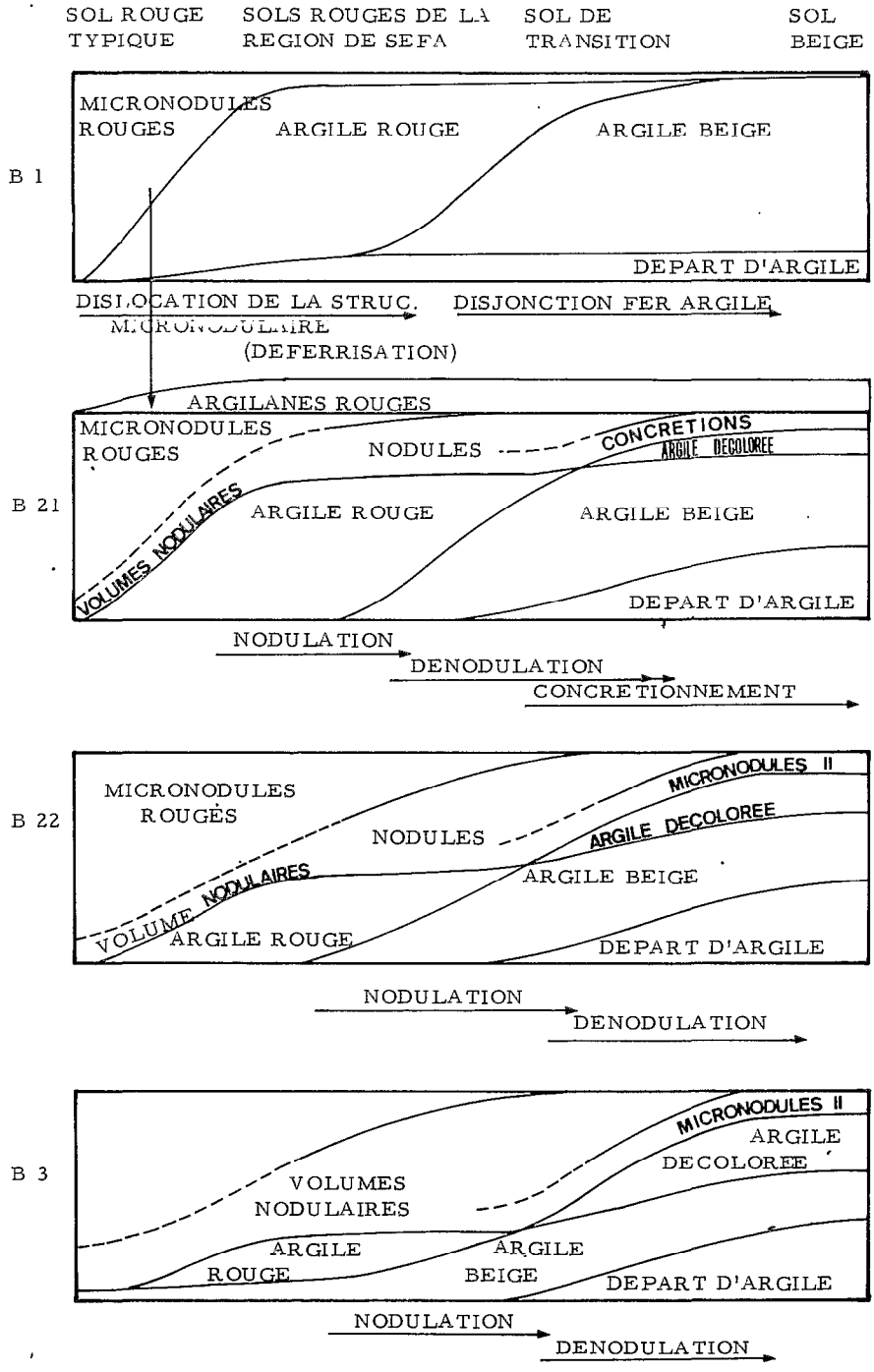


Fig. 12-1 - Bilan semi-quantitatif des organisations plasmiques.

avons appelé "horizon de comportement" (CHAUVEL et FAUCK, 1969). Les résultats de l'expérimentation (chapitres 10 et 11) nous conduisent aujourd'hui à penser que cette évolution est liée à la fois à des actions physiques de nature pédohydrique (qui rompent les liaisons interparticulaires) et à l'effet de la "deferrisation" de la kaolinite (qui lui restitue son comportement véritable de matériau argileux).

A cette dislocation et à cette digestion des micronodules succèdent, au niveau des sols de transition, l'éclaircissement de la couleur (jaune rouge à beige) puis le développement de taches diffuses, indices d'une disjonction du fer et de l'argile. Cette évolution s'intensifie par la suite et se traduit globalement par une deferrification importante de l'horizon (fig. 7-1, p.) sans toutefois que le taux d'argile granulométrique soit modifié de manière appréciable.

b) Bilan des organisations plasmiques dans l'horizon B 21 .

Aux transformations précédemment décrites s'ajoutent ici divers processus qui sont successivement :

- une nodulation, qui intervient après déferrisation de l'horizon B 1 : une partie de la structure micronodulaire devient plus dense et opaque et tend à s'individualiser ; tandis que la partie restante, brassée et homogénéisée par la faune s'éclaircit et forme un fond matriciel dont le plasma est beige. Cette évolution, qui se manifeste par des redistributions localisées, ne semble s'accompagner d'aucune variation importante des teneurs globales en argile et en fer,

- une dénodulation qui se manifeste dès que s'individualisent les nodules, par rectification de leurs surfaces, ségrégation localisée de la kaolinite et des hydrates ferriques à partir des discontinuités ainsi formées, et redistribution des constituants du plasma. Ces nodules donnent ainsi naissance à une argile décolorée qui est réincorporée par la faune au fond matriciel beige. Cette évolution semble correspondre à une perte d'argile et de fer (départ),

- un "concrétionnement", qui est l'aboutissement du processus de dénodulation là où existent de petites enclaves nodulaires dont la périphérie, imprégnée par les oxydes de fer issus de la ségrégation des constituants du plasma, forme un cortex qui tend à leur donner une structure

concentrique. Ces concrétions se maintiennent dans le fond matriciel de l'horizon B 21 de sol beige où elles constituent les reliques de l'organisation plasmique micronodulaire initiale. Leur différenciation s'effectue dans un matériau progressivement appauvri en argile et en fer.

c) Bilan des organisations plasmiques dans les horizons B 22 et B 3.

Les phénomènes restent du même type mais la nodulation prend ici une importance croissante et affecte une grande partie du volume du matériau ; il ne s'agit plus alors de simples enclaves mais plutôt d'un ensemble plus ou moins anastomosé qui, au niveau de l'horizon B 3, prend l'aspect d'une carapace.

- La dénodulation s'effectue alors par des taches qui envahissent la masse nodulaire et isolent de petits volumes rouges plus ou moins opaques ou micronodules secondaires (II), reliques de la structure nodulaire. Elle s'accompagne là encore, d'un départ important d'argile et de fer.

- Le concrétionnement enfin n'affecte que les petites enclaves nodulaires individualisées (aptes à former un cortex) très peu représentées dans les horizons profonds.

d) Conclusions.

Ainsi, de part et d'autre du sol de transition, des distributions fondamentalement différentes des organisations plasmiques ont pu être observées :

- dominance de "concentrations plasmiques" (BREWER, 1964) sous forme de micronodules primaires dans le sol rouge ;

- dominance de plasma présent dans le fond matriciel du sol beige où ne subsistent que des concrétions et micronodules secondaires (reliques).

La dissemblance est d'ailleurs telle qu'elle arrive à masquer de prime abord, la relation génétique qui existe entre les deux sols. Celle-ci n'est en effet clairement perçue qu'au niveau des sols de transition qui, limités à une frange étroite, sont caractérisés par la transformation de la structure micronodulaire des horizons B 2 et B 3 en une structure nodulaire susceptible de se dissocier dès le moment où elle s'individualise.

Notons qu'une transformation comparable des organisations plasmiques est observée dans des sols rouges cultivés depuis quelques dizaines d'années.

En définitive, les nodules apparaissent donc ici comme une forme transitoire de dégradation de la structure micronodulaire, forme qui est à même de se différencier rapidement à la suite d'un changement des conditions pédoclimatiques.

2/ - Estimation du bilan global (plasma-squelette).

Le squelette quartzeux ne participe directement à aucune des transformations précédemment décrites. Il en subit cependant les conséquences, particulièrement en ce qui concerne sa distribution et sa concentration relative, modifiées par les déplacements du plasma. C'est cet aspect qui sera pris en compte dans l'estimation du bilan global.

Par ailleurs, certaines organisations plasmiques, tels les micronodules et nodules, interviennent comme constituants de la charpente, soit en lieu et place du squelette quartzeux lorsque ce dernier est inclus dans leur assemblage (il ne joue alors qu'un rôle d'encombrement), soit à ses côtés (là ou minéraux primaires et particules complexes sont indépendants).

La représentation schématique du bilan proposé sur la figure 12-2 distingue à cet effet les constituants de la charpente (squelette quartzeux, nodules et concrétions) et ceux du plasma "libre" qui participe au fond matriciel.

Un examen de cette figure permet alors de constater que :

- les constituants de la charpente sont dominants dans l'ensemble des sols rouges où ils forment une armature rigide,

- le plasma "libre" devient, à l'inverse, largement dominant dans l'horizon B 1 des sols de transition où apparaît un étranglement de la macroporosité ; son abondance diminue en revanche progressivement avec la profondeur au sein des horizons B 21, B 22 et B 3 (comme elle le ferait dans un profil d'altération),

- les constituants de la charpente sont, à nouveau plus largement représentés dans les horizons B 1 et B 21 du sol beige ; mais il s'agit dans ce cas essentiellement du squelette quartzeux dont la différenciation verti-

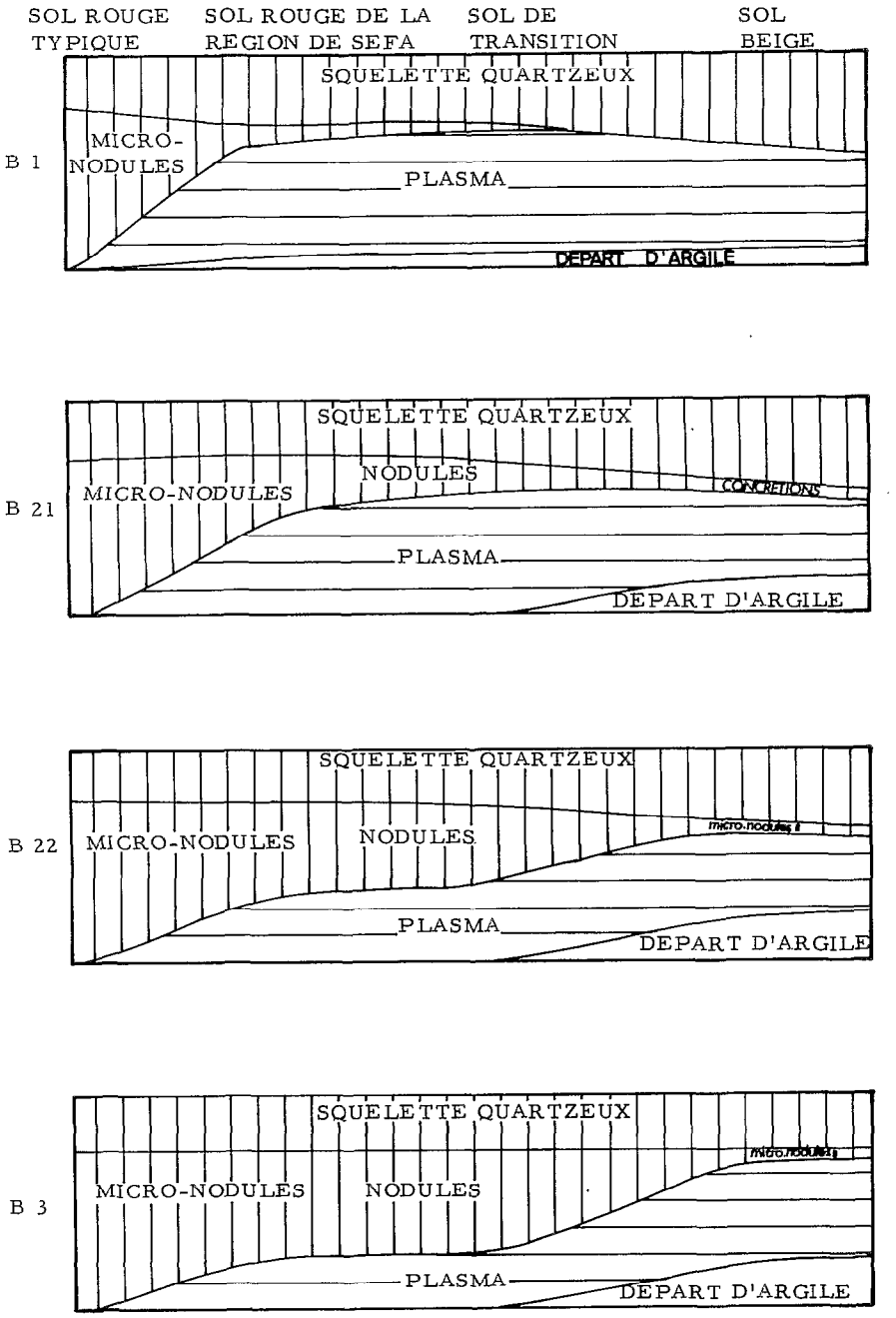


Fig. 12-2 - Bilan semi-quantitatif global

cale s'accentue alors que ne subsistent que des reliques des organisations micronodulaires et nodulaires. A l'inverse, c'est le plasma qui devient prépondérant dans les horizons B 22 et B 3 où se manifeste un tassement (mis en évidence par les mesures de porosité).

Ainsi reconnaît-on, de bas en haut, et en allant des sols rouges vers les sols beiges, 3 stades différents en ce qui concerne l'importance relative des constituants de la charpente par rapport à ceux du plasma "libre" :

- prépondérance de la charpente, à l'état micronodulaire et nodulaire dans le sol rouge et la partie inférieure du sol de transition,

- prépondérance du plasma "libre" (et intervention d'un tassement) dans l'horizon B 1 de sol de transition et la partie inférieure du sol beige,

- prépondérance de la charpente représentée par le squelette quartzeux dans les horizons B 1 et B 21 de sol beige.

Un tel état de chose semble être sous la dépendance, au moins dans la première phase, de l'évolution des organisations plasmiques, qui sont elles-mêmes liées à la dynamique des composés ferrifères. Il faut donc envisager maintenant la question du comportement général du fer.

3/ - Comportement et dynamique globale du fer.

Les indications essentielles relatives à ce sujet, déduites de l'observation microscopique et de l'analyse chimique (fig. 7-1 p.), ont été rassemblées sous une forme graphique simplifiée dans la figure 12-3.

Un examen de ce schéma permet alors de distinguer encore trois domaines :

- le domaine des sols rouges caractérisés par un maintien à peu près total du fer (et de l'argile) auquel fait seulement exception le déplacement des hydrates ferriques véhiculés par l'argile, de l'horizon B 1 à l'horizon B 2 (correspondant au plasma des argilanes rouges redistribué là où se disloque la structure micronodulaire) ;

- le domaine des sols de transition où s'effectue une redistribution du fer ; celui-ci perdu par le fond matriciel pédoturbé, s'accumule dans les volumes nodulaires (à structure micronodulaire conservée), tandis qu'un

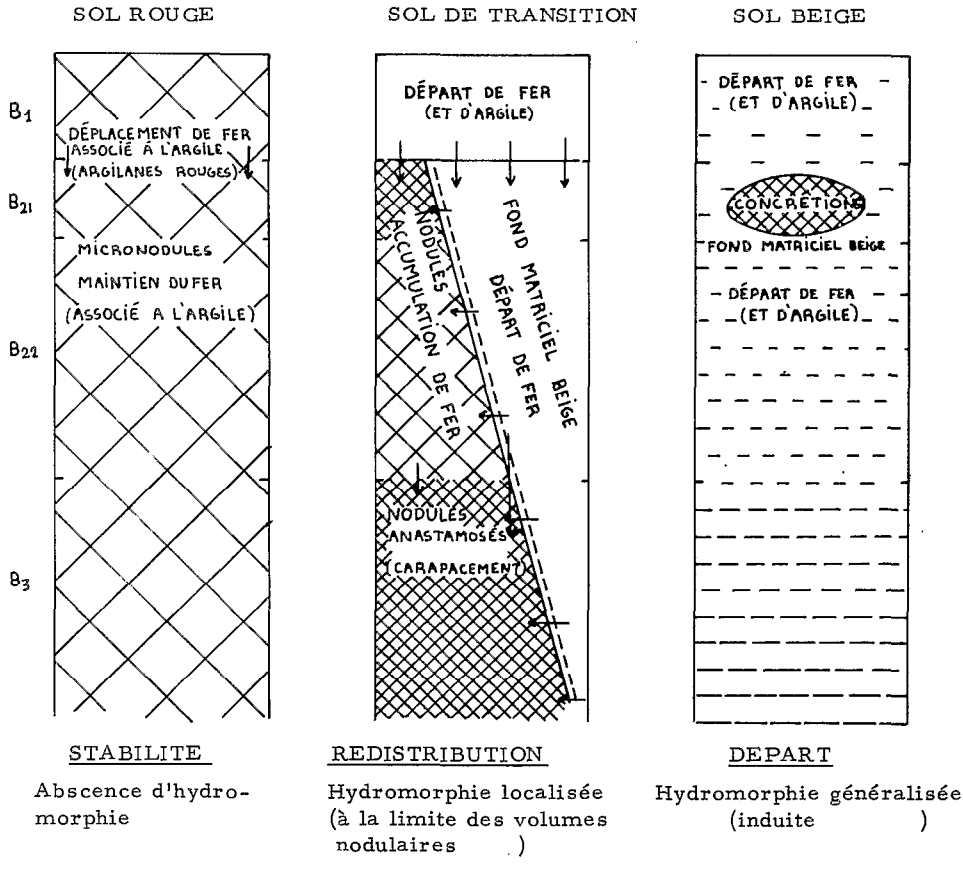


Fig. 12-3. Comportement et dynamique globale du fer.

hydromorphie localisée se manifeste le long des surfaces de discontinuité,

- enfin le domaine des sols beiges caractérisé par un départ régulier de fer ; seules sont conservées les accumulations résiduelles "enkystées" (ou "concrétions"), tandis que se développe une hydromorphie généralisée (à l'origine du "pseudogley").

En définitive, la dynamique des composés du fer semble être liée aux modifications de leur état d'association avec les autres constituants minéraux sous l'effet des processus d'hydromorphie, d'abord limités aux surfaces de discontinuité qui entourent les volumes nodulaires (au contact de deux systèmes poreux différents), puis de plus en plus généralisés dans les sols beiges.

B - ETUDE DES RELATIONS AU SEIN DU SYSTEME "ARGILE - FER - SQUELETTE".

1/ - Relations "argile-fer".

Le comportement du fer associé au plasma a été résumé dans la figure 12-4.

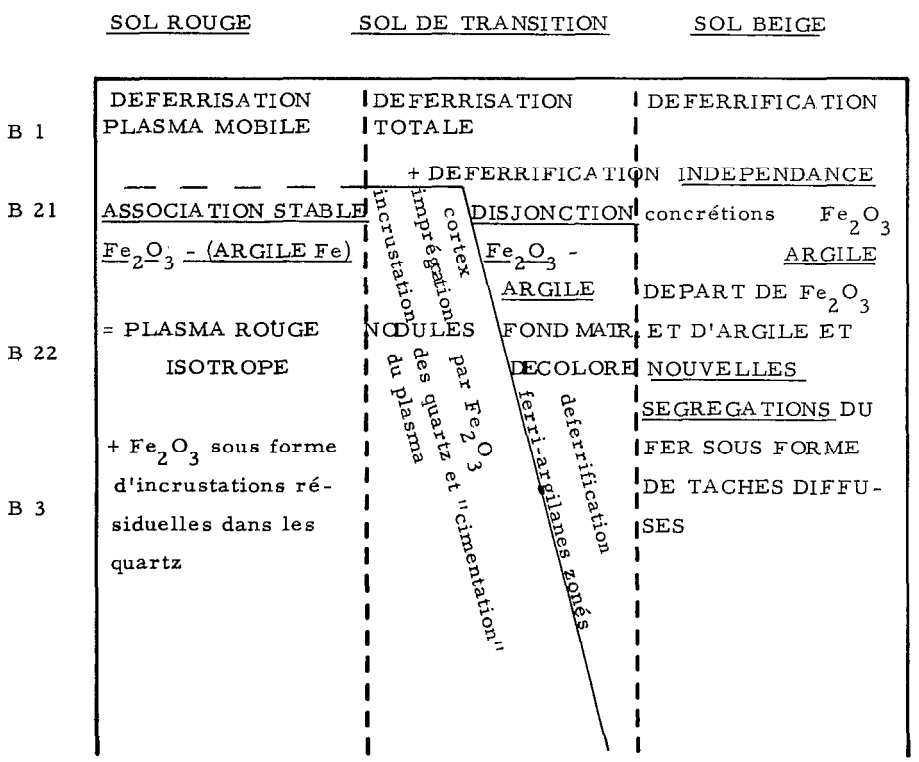


Fig. 12-4 - Comportement et dynamique du fer associé au plasma.

L'examen de ce schéma conduit à faire plusieurs remarques :

- Tout d'abord le maintien du fer dans le sol rouge apparaît bien être lié à l'existence d'une association stable entre les oxy-hydrates de fer et les constituants du plasma, mise en évidence par la concordance des courbes de distribution de "Fe_2O_3 total" et de la fraction granulométrique argileuse (fig. 7-1, p. 155). Examinée au microscope, cette association se présente sous la forme de micronodules de plasma rouge, dense, isotropes, relativement homogènes, dont les dimensions sont de l'ordre de 100 µ. Il semble que ces micronodules représentent des "volumes critiques" au sein desquels les tensions exercées lors des changements d'humidité sont équilibrés par les forces de liaison interparticulaires ; ainsi l'assemblage plasmique est maintenu aisément sans modification appréciable de son volume et de sa forme.

- Cet équilibre n'est rompu qu'au niveau de l'horizon B 1 (dit "de comportement") dans lequel, à la mobilisation et à l'activation relative de l'argile (manifestées par la réorientation des cristallites et par l'accroissement de l'aptitude au gonflement et de la capacité d'échange) correspond une légère diminution de sa teneur en fer (tableau 10-10) que nous avons attribuée à la déferrisation de la kaolinite, c'est-à-dire au départ d'une faible quantité de fer, probablement sous forme d'ions ferriques plus ou moins hydroxylés intervenant dans la compensation des charges du minéral argileux et responsables du "masquage".

Cette déferrisation coïncide avec une diminution de la valeur du pH K Cl qui s'accentue latéralement à l'approche du sol de transition, atteignant alors des valeurs inférieures à 4 (fig. 7-9, p. 174) tandis qu'augmente la mobilité relative des particules argileuses. Or ces mesures de pH sont considérées comme étant les plus révélatrices de l'acidité présente à la surface des micelles. Ceci tendrait donc à confirmer l'hypothèse d'un démasquage des sites d'échange de la kaolinite précédemment occupés par des ions ferriques.

- Enfin, dès que l'argile est totalement libérée au sein de l'horizon B 1 du sol de transition, se manifeste un autre phénomène : c'est la déferrification du plasma révélée par une forte diminution du rapport : fer total/argile

(fig. 7-1). Cette évolution semble être la conséquence d'une hydromorphie liée aux modifications de comportement hydrique du matériau (franchement argileux et privé de la charpente qui s'opposait, dans le sol rouge, au tassement des macrovides).

L'irrégularité de l'humectation et du drainage vertical gagne ensuite les horizons sous-jacents où elle semble être à l'origine d'une disjonction localisée du fer et de l'argile, qui a pour effet d'accroître la cimentation en certains points et d'affaiblir ailleurs les forces de liaison interparticulaires. Cette différenciation est révélée par la faune qui circonscrit des volumes nodulaires à structure (micronodulaire) conservée dans lesquels le fer tend à s'accumuler, et soumet à un brassage permanent les secteurs plus meubles. De nouvelles ségrégations du fer et de l'argile se développent ensuite à partir des surfaces de discontinuité ainsi formées au contact de deux systèmes poreux différents. Leurs effets se manifestent par la redistribution des hydrates ferriques à la périphérie des nodules : formation d'un cortex dans l'horizon B 21, et décoloration du pourtour des volumes nodulaires dans les horizons B 22 et B 3.

Une partie des oxydes de fer ainsi libérés par le plasma se fixe sous forme d'incrustations dans les fissures des quartz, provoquant l'éclatement des grains primaires dont les fragments restent toutefois accolés par suite de la présence des ciments ferriques.

- Lorsque cette disjonction a gagné la plus grande partie du volume du sol beige (où seuls subsistent les nodules enkystés ou "concrétions"), les dynamiques du fer et de l'argile deviennent relativement indépendantes ; elles sont caractérisées par un départ appréciable de l'un et l'autre constituant, et par une nouvelle redistribution des hydrates ferriques, sous forme de taches diffuses en relation avec la distribution des macropores, sous l'effet d'une hydromorphie induite.

2/ Action du fer sur l'état d'organisation : plasma-squelette.

Les seules observations microscopiques suffisent à montrer que toute variation de la relation entre le fer et le plasma se répercute sur l'état

d'association de ce dernier avec le squelette (fig. 12-5).

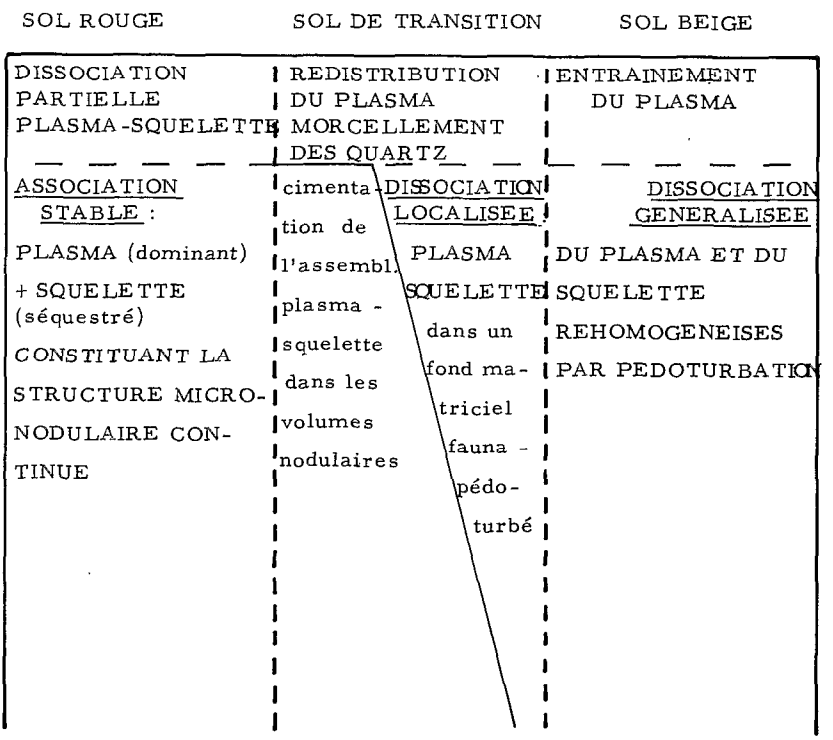


Fig. 12-5 - Variations de l'association : Plasma-squelette.

- Tout d'abord, le plasma rouge isotrope, constituant la structure micronodulaire, est presqu'insensible aux effets de gonflement et de retrait occasionnés par les variations d'humidité. Il a donc dans ce domaine un comportement assez proche de celui des grains de quartz avec lesquels il s'associe pour constituer la "charpente" du matériau. Comme en même temps, il domine par son volume, il intègre de la sorte les quelques grains grossiers, et surtout "séquestre" la plupart des grains plus fins, dont le rôle se trouve alors limité à une fonction d'encombrement (bien que leur évolution, et plus particulièrement leur dissolution puisse alors se poursuivre lentement).

- Lorsque les cristallites de kaolinite sont libérées et activées sous l'effet de la deferrisation au niveau de l'horizon B 1, les variations d'humidité (d'autant plus importantes que le pédoclimat est plus contrasté) se traduisent par des actions de gonflement et de retrait qui n'affectent que l'assemblage plasmique, créant ainsi des tensions au contact des quartz (celles-ci se manifestent par des réorientations localisées sur le pourtour des grains). Les actions mécaniques d'origine biologique suffisent alors à provoquer des dissociations localisées (néomatranes), tandis qu'une redistribution des constituants argileux s'amorce par l'effet de l'éluviation et de l'illuviation, cette redistribution s'accentue d'ailleurs verticalement de bas en haut, et latéralement depuis les sols rouges jusqu'au sol de transition.

- La dissociation du plasma et du squelette tend alors à se généraliser aux horizons plus profonds, à mesure que se propage la disjonction du fer et de l'argile, selon un front marqué par la présence d'argilanes zonés. Les grains de quartz qui sont inclus dans le plasma rouge plus ou moins cimenté des volumes nodulaires, sont alors progressivement incrustés d'oxyde de fer (au contact des zonations sombres), puis progressivement expurgés des volumes nodulaires et enfin disséminés dans le plasma clair où les ciments ferriques qui les maintiennent assemblés se dissolvent.

Conclusions.

Les principales modifications affectant les relations "fer-argile" et "plasma-squelette" sont résumées dans le tableau 12-1.

L'examen de ce tableau suggère les conclusions suivantes :

- Il y a bien un passage continu des sols rouges aux sols beiges.
- Les sols beiges proviennent de la transformation des sols rouges par simple réorganisation et redistribution des constituants du sol.
- L'évolution résulte d'une disjonction entre "l'argile et le fer" au sein du plasma, suivie d'une dissociation "plasma-squelette". Toute l'évolution tourne donc autour de la trilogie fondamentale "argile-fer-squelette".

Il reste à envisager maintenant les mécanismes qui sont à la base des transformations et à préciser les conditions de la propagation des phénomènes.

Tableau 12-1.

MODIFICATION DES RELATIONS : "FER-ARGILE" et "PLASMA-SQUELETTE".

SOLS	ROUGE	DE TRANSITION		BEIGE
Relations : fer-argile	CONCORDANCE Association	nodulation → DISJONCTION Redistribution		dénodulation → INDEPENDANCE Ségrégation
Plasma	Bloqué (granulaire)	Piégé dans les nodules	libéré	partiellement éluvié
Squelette (quartz)	Sequestré	Incrusté d'oxyde de fer	expurgé	disséminé
Relations : "Plasma-squelette"	ASSOCIATION	DISSOCIATION LOCALISEE		DISSOCIATION GENERALISEE

Chapitre 13

CONDITIONS GÉNÉRALES DE LA TRANSFORMATION DES SOLS ROUGES DE CASAMANCE

MODALITÉS DE LA PROPAGATION DES PHÉNOMÈNES

La synthèse morphologique sur les toposéquences de moyenne Casamance nous a montré que la distribution ordonnée des organisations pédologiques résultait, en fait, des transformations successives de l'état d'association des constituants du sol rouge (oxy-hydrates de fer, kaolinite et quartz), qui affectent d'abord la structure plasmique, puis les relations entre le plasma et le squelette et enfin, la différenciation du profil pédologique. C'est ce qu'on peut désigner sous le terme général de "déferrallitisation" des sols rouges de Casamance sur lequel nous reviendrons dans le dernier chapitre.

A - CONSIDERATIONS SUR LES MECANISMES DE LA TRANSFORMATION DES SOLS ROUGES.

1/ - L'évolution des conditions pédohydriques et l'importance du phénomène "d'ultradessiccation".

Nous savons que la région étudiée est située à la limite du bioclimat sahelo-soudanais (cf. chapitre 2) et qu'elle est caractérisée à la fois par une très rapide décroissance de la pluviosité du sud au nord, et par un contraste marqué entre deux saisons :

- l'une, humide, durant laquelle les précipitations, largement excédentaires par rapport à l'évapotranspiration potentielle, provoquent soit un drainage vertical, soit des engorgements et un écoulement latéral,
- l'autre très sèche, sans pluie appréciable.

Dans ces conditions, la couverture végétale exerce une action très importante sur le pédoclimat.

- C'est ainsi que sous forêt, l'exploitation des réserves en eau du sol par les racines s'effectue jusqu'à une grande profondeur (supérieure à 6 mètres) de telle sorte que l'évapotranspiration n'est jamais totalement interrompue et qu'une certaine humidité de l'air est maintenue sous les arbres.
  D'un autre côté, protégé par l'écran des frondaisons, le sol n'est jamais soumis qu'à de faibles variations de température (cf. fig. 2-3 et 2-4 p. 46 et 47).

- Sous culture, l'enracinement ne dépasse généralement pas 80 centimètres et les réserves en eau "utile" accessible aux plantes sont épuisées quelques semaines après les dernières pluies. Le sol est alors mis au contact d'une atmosphère dont l'humidité relative atteint de faibles valeurs, qui provoqueraient, si l'équilibre était réalisé, une très forte dessiccation (tableau 13-1). Exposé directement aux rayons du sol, il s'échauffe fortement durant la saison sèche (cf. fig. 2-4) : sa température à 1,5 mètre de profondeur, est alors supérieure de 7° à celle mesurée sous forêt, tandis que le gradient thermique est porté à des valeurs extrêmes.

Le régime hydrique des sols est alors dépendant, à la fois de leurs caractéristiques intrinsèques (qui déterminent leur réaction) et des conditions de milieu qui déterminent la contrainte (cf. chapitre 8). Examinons le plus en détail pour les principaux types envisagés :

- Le sol rouge sous forêt est, pendant la saison des pluies, porté progressivement, de haut en bas, et sur toute sa profondeur (comme cela est indiqué schématiquement sur la fig. 13-1), à des humidités stables qui définissent

Tableau 13-1.

RELATION THEORIQUE ENTRE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR, LE POTENTIEL MATRICIEL ET LE DIAMETRE EQUIVALENT DES PORES A L'EQUILIBRE*

HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR		CONTRAINTE		DIAMETRE MAXIMUM DES PORES OCCUPE PAR L'EAU A L'EQUILIBRE (ϕ µ)
Hr %		Potentiel matriciel (cm d'eau)	pF	
99, 92	Humidité relative effectivement atteinte en moyenne Casamance en zone découverte durant la saison sèche.	1 000	3	3 µ
99, 27		10 000	4	0, 3 µ
93, 00		100 000	5	0, 04 µ
48, 43		1 000 000	6	
16, 7		2 500 000	6, 4	
0, 07		10 000 000	7	

* Correspondance établie en se référant à la loi de JURIN-LAPLACE et à la démonstration de THOMAS-KELVIN (FEODOROFF, 1972).

sa "capacité au champ" *. Il reste alors très filtrant, de telle sorte que l'eau excédentaire draine verticalement et alimente la nappe phréatique. Après les dernières précipitations, les réserves "utiles" sont exploitées par les racines, d'abord dans les horizons A, AB et B 1, puis plus profondément (jusqu'à 6 mètres et plus), si bien que l'humidité atteint au cours de la saison sèche des valeurs proches du point de flétrissement dans la plus grande partie du profil. Il reste cependant dans le sol des quantités d'eau importantes qui ne sont pas disponibles pour les plantes et qui restent retenues par une porosité très fine (pF 4, 2, $\phi \leqslant 0,2$ µ). Seule une fraction de cette eau liée, contenue dans les horizons superficiels (A et AB,

* Il revient à HUMBEL (1976) d'avoir reconnu que ces deux états stationnaires de référence, réalisés l'un en saison humide et l'autre en saison sèche, sont caractéristiques, respectivement du domaine des sols ferrallitiques et de celui des sols ferrugineux tropicaux.

sur 25 cm) peut être néanmoins évaporée dans l'air très sec pendant la saison aride : elle correspond à ce que nous appellerons ici l'"ultradessiccation"* particulièrement faible dans ce cas (cf. fig. 8-6, p. 212).

- Le sol de transition sous forêt se distingue principalement du précédent par l'extension de cette "ultradessiccation", qui atteint ici plus de 80 cm de profondeur et porte sur plusieurs points d'humidité lors des années exceptionnelles. Les variations sont alors dépendantes des conditions extrêmes d'aridité (tableau 13-1) et ne présentent aucune référence stable au cycle saisonnier normal.

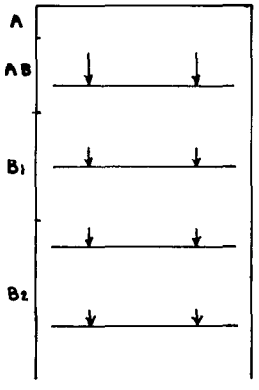
- Le sol beige sous forêt, à l'inverse du sol rouge, serait caractérisé par un état hydrique stationnaire de référence réalisé chaque année en fin de saison sèche, correspondant à des humidités régulièrement inférieures au point de flétrissement, jusqu'à 1,6 mètre de profondeur. Cet état serait influencé par l'existence d'un horizon superficiel sableux, à porosité très grossière, nettement différencié, qui limite les possibilités de dessiccation (effet de "mulch").
  L'infiltration s'y effectue de façon irrégulière et rapide au début de la saison des pluies par des voies préférentielles (fentes de retrait)à partir desquelles l'eau diffuse. La vitesse de filtration diminue alors progressivement, limitant les possibilités de drainage vertical et créant des engorgements localisés, généralement subsuperficiels, à partir desquels peut se développer un écoulement latéral.

---

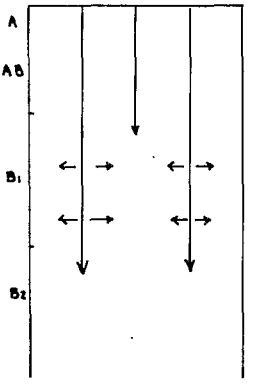
* Il s'agit ici du processus de dessèchement physique par lequel l'eau remonte vers la surface du sol, se vaporise et s'échappe vers l'atmosphère, provoquant l'abaissement de l'humidité nettement au-dessous du point de flétrissement.

- Le sol rouge cultivé est généralement soumis durant la saison sèche à une "ultradessiccation" qui affecte l'ensemble des horizons A, AB et B 1, c'est-à-dire près de 80 cm d'épaisseur (cf. fig. 5-6) ; ce sol se rapproche donc en cela du sol de transition. Ses horizons plus profonds sont cependant maintenus à une humidité nettement supérieure au point de flétrissement.

Les différences relatives au mode d'humectation sont représentées de façon schématique sur la fig. 13-1.



HUMECTATION REGULIERE DU SOL ROUGE
(Chaque couche de sol est progressivement portée à la capacité au champ avant que ne s'humectent les horizons profonds.



HUMECTATION IRREGULIERE DU SOL BEIGE
(l'eau pénètre rapidement par des voies préférentielles au début de la saison des pluies, puis diffuse latéralement tandis que la vitesse de percolation diminue.

Fig. 13-1 - Modalités de l'humectation des sols rouges et des sols beiges.

Les particularités relatives au fonctionnement hydrique de chacun des sols considérés, sont regroupées dans le tableau 13-2.

De ces données, il résulte en définitive que si l' "ultradessiccation" affecte dans tous les cas la partie la plus superficielle du profil, la profondeur atteinte augmente progressivement (ou irrégulièrement) lorsque l'on

Tableau 13-2.

VARIATIONS DES CONDITIONS PEDOHYDRIQUES DANS LA TOPOSEQUENCE ET LA SEQUENCE DE SOLS ROUGES CULTIVES

SOLS SOUS FORET (toposéquence)	ROUGE	"DE TRANSITION"	BEIGE
Etat hydrique stationnaire de référence	en saison des pluies habituelles	intervention des seules conditions extrêmes	en fin de saison sèche normale
Drainage vertical	non limité		limité
Profondeur atteinte par l'ultradessiccation	25 cm	>80 cm	1, 6 mètre
Principaux horizons affectés	A (et AB)	A, AB et B 1	A, AB, B 1, B 21
	RESISTANCE DU SOL ROUGE SEUIL		BASCULEMENT

SOLS ROUGES CULTIVES (séquence)	APRES QUELQUES DIZAINES D'ANNEES
Profondeurs atteintes par l'ultradessiccation	>80 cm
Principaux horizons affectés	A, AB et B 1
	RESISTANCE DU SOL ROUGE SEUIL

passe du sol rouge sous forêt, au sol de transition et au sol rouge cultivé.

Tout d'abord cette évolution hydrique ne se traduit pas par d'autres effets que le développement localisé de colorations plus jaunes, la distribution par paliers des constituants du plasma et l'appauvrissement en argile des horizons A et AB. Mais il semble qu'un seuil puisse intervenir par la suite : il se situe au niveau de l'horizon B 1 qui apparaît ainsi comme la zone sensible du profil : dès que cet horizon est atteint par le front d' "ultradessiccation", on note en effet une modification des possibilités ultérieures de drainage, et, par la même, un bouleversement complet du fonctionnement hydrique du profil.

2/ - Conséquences microstructurales et physico-chimiques de l' "ultradessiccation".

L'ultradessiccation peut avoir deux sortes de conséquences :

- les unes s'exercent sur la transformation de la structure par l'effet des contraintes exercées ;
- les autres concernent l'évolution physico-chimique de l'état de la surface des argiles.

Nous examinerons successivement ces deux aspects du problème.

a) Aspect microstructural.

α) Les différents types de vides - problème de leur remplissage et de leur vidage.

Nous savons maintenant que le matériau du sol rouge typique est caractérisé par une structure micronodulaire, représentée de façon schématique sur la figure 13-2.

Or, dans cet agencement, il est aisé de distinguer deux ensembles de vides :

- Les vides intermicronodulaires, de dimensions généralement comprises entre 2 et 100 μ. Ils assurent, d'une part la mobilité et la distribution régulière de l'eau dans la masse du sol, d'autre part sa rétention sous des contraintes faibles, ce qui permet son utilisation par les plantes. De plus, lorsque varie l'humidité, cette porosité

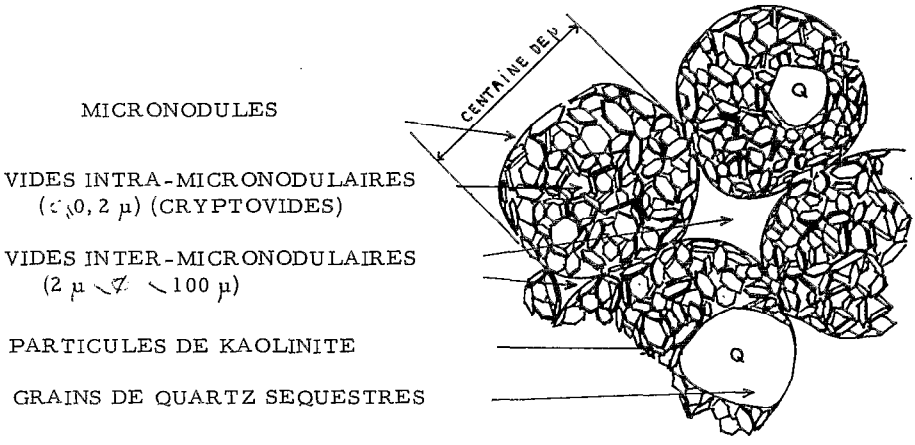


Fig. 13-2 - Représentation schématique de la structure micronodulaire.

est maintenue par la charpente indéformable des micronodules. Ainsi s'explique, tant que cette structure est conservée, la constance de la vitesse de filtration et la stabilité de l'état hydrique de référence qui se reproduit lors de chaque saison humide.

- Les vides intramicronodulaires qui se trouvent au sein de l'assemblage plasmique isotrope. Leurs dimensions sont en relation avec la taille des particules (ici généralement inférieure à 0, 2 μ). Il s'agit donc d'une porosité très fine ("cryptovides") dans laquelle l'eau est retenue avec une forte énergie, ce qui la rend indisponible pour les plantes et seulement susceptible d'être évaporée dans un air très sec. Cette porosité est maintenue grâce à l'individualisation d'un assemblage tridimensionnel des cristallites de kaolinite. Or, nous savons que l'état d'association de ce dernier est stabilisé par un certain nombre de fortes liaisons, probablement assurées par

l'intermédiaire d'ions ferriques plus ou moins hydroxylés (cf. chapitre 11). Tant que celles-ci sont conservées, l'assemblage reste indéformable et assure, de ce fait, la pérennité de l'organisation pédologique.

L'ensemble constitué par les deux systèmes poreux ainsi définis est autorégulé : l'évacuation des vides intermicronodulaires provoque en effet une forte diminution de la conductivité hydraulique et assure, en conditions normales, la conservation de l'eau dans les micropores de l'assemblage plasmique (cf. chapitre 8).

(b) Modification du fonctionnement par l'ultradessiccation.

Ce fonctionnement se maintient tant que ne sont pas imposées à la structure des contraintes supérieures à ses possibilités de résistance. Or ceci se produit précisément dans des conditions extrêmes, lorsque le sol est soumis à une "ultradessiccation", en relation avec les très faibles humidités atmosphériques qui interviennent durant la saison sèche, de façon plus ou moins agressive selon les années et selon la protection assurée au sol par l'écran végétal.

Une partie de l'eau contenue dans les vides intramicronodulaires peut alors être extraite par évaporation. Il en résulte des ruptures de liaisons interparticulaires et l'envahissement par l'air de volumes précédemment occupés en permanence par l'eau. Lorsqu'il y a ultérieurement réhumectation, celle-ci s'effectue nécessairement dans des conditions différentes, provoquant un gonflement et une réorientation des particules.

C'est donc dans ce cas l'alternance du vidage partiel des cryptovides en période très aride et de leur réoccupation par l'eau, qui semble être à l'origine de la libération des particules de kaolinite précédemment bloquées et de leur réarrangement. Une transformation comparable est d'ailleurs obtenue expérimentalement en soumettant des agrégats de sol rouge à une dessiccation à l'air libre, puis à une saturation sous vide par capillarité (cf. chapitre 11).

Lorsque l'ultradessiccation intervient de façon limitée dans le sol en place, son action affecte surtout la périphérie des micronodules où se forment des liserés d'argile jaune orientée, tandis que le pourtour des vides devient plus découpé, que se développent les séparations plasmiques et que

s'accentuent les contrastes. Ce faciès particulier, décrit dans l'horizon B 22 du sol de transition, exprimerait donc la réaction de la structure micronodulaire soumise à une agression pédoclimatique insuffisante pour provoquer son effondrement. A ce stade de l'évolution, les actions qui sont réversibles selon les conditions de milieu semblent être plus ou moins cumulatives.

Une ultradessiccation plus poussée porte atteinte à la plus grande partie des micronodules contenus dans le matériau :

- là où les micronodules sont isolés les uns des autres (remontées biologiques dans les horizons superficiels), ils sont progressivement dissociés et les particules libérées peuvent, par la suite être réorientées ou déplacées individuellement,
- là où les micronodules sont assemblés en une structure continue, une partie de celle-ci s'effondre, laissant place à des micronodules disséminés dans un plasma continu, anisotrope, constitué de particules mobiles les unes par rapport aux autres ; la partie restante de la structure micronodulaire ne constitue plus alors que des enclaves dont les vides interstitiels sont occupés par les ferri-argilanes issus de la redistribution des constituants.

γ) Effet sur la dynamique du sol.

Quant à l'effet exercé sur la dynamique du sol, il dépend en outre de la charpente constituant le matériau :

- si celle-ci est assurée principalement par le squelette quartzeux, les macrovides sont maintenus ce qui permet au drainage vertical de se poursuivre, entraînant alors vers la base du profil les produits de dissociation des micronodules (qui formeraient par exemple les ferri-argilanes jaunes observés en profondeur, dans l'horizon B C).
- A l'inverse, dans le cas où la charpente est constituée par la structure micronodulaire elle-même, l'ultrades-

siccation joue un rôle capital ; elle peut d'ailleurs provoquer deux évolutions différentes selon le rapport entre la vitesse de libération de l'argile et le degré d'effondrement de la structure micronodulaire.

. Lorsque la première reste faible par rapport au second, la capacité d'évacuation du matériau est suffisante pour entraîner au fur et à mesure les produits de la dissociation et s'opposer au colmatage. Il se produit alors progressivement une relève de l'armature micronodulaire par celle du squelette quartzeux. Une telle évolution semble être la conséquence de dessiccations progressives et fréquentes dans les conditions les plus favorables au drainage vertical. Elle expliquerait : d'un côté la formation de sols "allégés" et éclaircis en relation avec la culture le long des grands axes de drainage (cf. chapitre 3) et d'un autre celle des sols rouges sableux observés au nord de la Gambie. Elle correspond, en fait, à la généralisation du processus d'"appauvrissement" * .

. Lorsqu'il se produit à la fois une libération importante d'argile et un brusque effondrement de la structure micronodulaire sous l'effet de conditions pédoclimatiques extrêmes, il en résulte un colmatage et une limitation des possibilités de drainage qui s'accentue dans le temps et se répercute sur le fonctionnement hydrique de l'ensemble du profil.

---

* Le terme d' "appauvrissement" a été utilisé par FAUCK (1964) pour "définir un fait morphologique : l'existence d'horizons supérieurs pour lesquels l'analyse révèle une richesse moins élevée en argile granulométrique, fer et titane, que celle des horizons B profonds, homogènes et rubéfiés qu'ils surmontent".

δ) Existence de différents seuils.

Ceci étant, on est amené à considérer plusieurs seuils :

- Le premier est relatif à l'intensité de la dessiccation au-delà de laquelle se produit un vidage des cryptovides de l'assemblage isotrope et une rupture des liaisons interparticulaires qui en assuraient le maintien, provoquant un effet de contraction.
- Le second a trait à la constitution de la charpente du matériau atteint par cette évolution :
  - . quand celle-ci est essentiellement constituée de quartz, l'effet produit est un lessivage vertical et lointain de l'argile, cause de l'appauvrissement des sols rouges
  - . quand les micronodules en forment l'armature, tout dépendrait de l'allure prise par les "ultradessiccations".
    - + fréquentes et progressives, elles provoqueraient l'extension de l'appauvrissement (sols rouges sableux),
    - + exceptionnelles et fortes, elles seraient à l'origine du colmatage des sols (sols beiges).

Le tableau 13-3 résume brièvement la situation.

Ajoutons encore que d'autres processus, secondaires aux effets de l'ultradessiccation, n'en exercent pas moins cependant une action déterminante sur l'évolution ultérieure du sol :

- Les premiers résultent de l'activité de la faune : tandis que celle-ci renforçait l'homogénéité dans le matériau micronodulaire, elle accentue la dissociation et la délimitation des enclaves micronodulaires par des surfaces de discontinuité (à l'origine des nodules et concrétions), dès qu'intervient l'ultradessiccation ; elle exerce donc une action sélective dans les secteurs où les liaisons interparticulaires sont les moins fortes.

Tableau 13-3

INFLUENCE DE L' "ULTRADESSICCATION" SUR LES MATERIAUX MICRONODULAIRES ROUGES.

Dessiccation / Constituants dominants de la charpente	Forêt	pF 4,2 Savanes et cultures	
	exploitation des réserves en eau du sol par la végétation	"Ultradessiccations" fréquentes et progressives	exceptionnelles et fortes
Quartz	-	appauvrissement	appauvrissement
Micronodules	conservation des micronodules	destruction régulière des micronodules et appauvrissement	destruction brutale des micronodules et colmatage

- Les seconds sont une conséquence des transformations de l'organisation : au contact de deux systèmes poreux différents (tant par la distribution dimensionnelle des vides que par leur déformabilité) se développe une hydromorphie ponctuelle induite qu'on peut détecter par des ségrégations localisées des hydrates de fer et de la kaolinite : elle tend d'ailleurs à se généraliser dans les sols beiges, provoquant alors la formation d'un véritable pseudogley.

b) Aspect physico-chimique.

L' "ultradessiccation" qui remplace une partie de l'eau retenue entre les particules d'argile par de l'air et qui brise les liaisons interparticulaires, change le fonctionnement hydrique et modifie de cette façon la réactivité physico-chimique et de la garniture ionique des surfaces.

Celle-ci peut être mise en évidence tout d'abord par une augmentation notable, de bas en haut, dans l'horizon B 1 du sol rouge (cf. fig.7-7. p. 169) de la capacité d'échange rapportée au taux d'argile, à mesure que se disloque la structure micronodulaire et que diminue, très faiblement d'ailleurs,

la teneur en fer de l'argile (sans qu'intervienne une variation importante de la teneur en matière organique). Un accroissement comparable a été obtenu expérimentalement (cf. chapitre 11) par application au matériau rouge micronodulaire, du traitement "TAMM", reconnu apte à extraire le fer actif et à dissocier l'argile. Cet effet semble être ainsi directement lié à la libération des charges de la kaolinite initialement compensées par des ions hydroxylés ferriques, c'est-à-dire à la "déferrisation" du matériau (qui serait provoquée, dans les conditions naturelles, par une sorte de préhydromorphie, consécutive à l'effondrement de l'assemblage plasmique).

A ce premier indice d'activation physico-chimique, limité au sol rouge, correspond une diminution du pH K Cl. Celle-ci s'accentue fortement, au niveau de l'horizon B 1 lorsque la totalité de l'argile s'y trouve démasquée, c'est-à-dire à l'approche du sol de transition dans les toposéquences (fig.7-10 et 7-11), ou encore dans le sol rouge cultivé depuis 12 ans (fig. 7-12).

L'horizon sous-jacent B 2, où se produit la nodulation, est alors caractérisé par des pH moins acides, mais son évolution en direction du sol beige, marquée par une dissociation de ces mêmes nodules, est à son tour, un peu plus loin, marquée par une diminution sensible du pH K Cl.

Il semble donc qu'à la dissociation des assemblages isotropes (micronodulaires et nodulaires) corresponde le développement d'une acidité notable à la surface des micelles d'argile (exprimée ici par le pH K Cl). C'est ce qui est représenté schématiquement sur la figure 13-3.

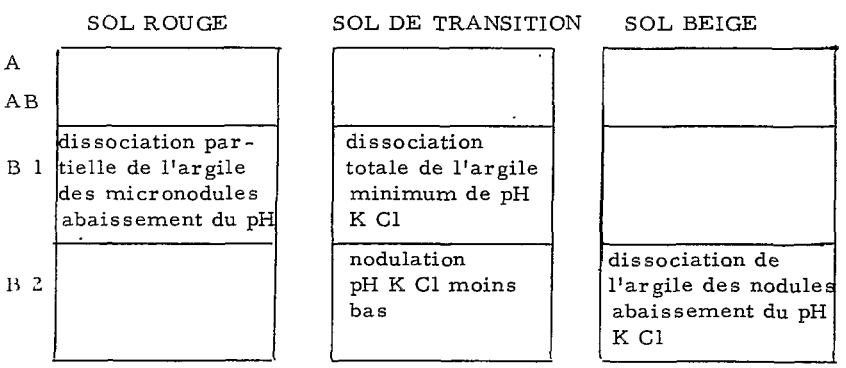


Fig. 13-3 - Relations entre la dissociation de l'argile et le pH K Cl.

D'un autre côté, la modification du complexe absorbant porte également sur l'équilibre des bases échangeables Ca et Mg (cf. fig. 7-13), comme cela est illustré schématiquement dans la figure jointe (fig. 13-4). La prédominance des ions Mg^{++} caractérise la plus grande partie du profil de sol rouge dans lequel n'intervient aucune limitation du drainage. Mais à partir du sol de transition, l'ordre s'inverse dans l'ensemble des horizons A, AB puis B 1 tandis que se manifestent des indices d'engorgement et que la vitesse de filtration diminue.

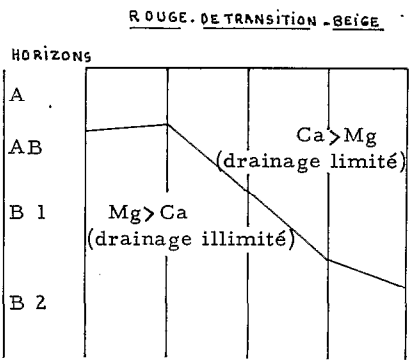


Fig. 13-4 - Variations de l'équilibre des bases échangeables Ca et Mg.

La même inversion est observée dans les sols rouges cultivés depuis 12 ans dont les profils présentent des caractères morphologiques comparables à ceux du sol de transition* (cf. fig. 7-14).

Une relation semblable avec les conditions de lixiviation a déjà été signalée par BOULET (1974). Il semble donc que l'on soit en présence ici d'une conséquence indirecte de l'"ultradessication", due à une modification du fonctionnement hydrique.

x

x x

Un autre effet indirect, lié à la dynamique de l'eau, concerne la disjonction du fer et de l'argile, dès qu'intervient la formation d'engorgements localisés à la limite entre des systèmes poreux différents, et donc des variations de potentiel d'oxydo-réduction ; ce sont ces derniers qui sont responsables d'une redistribution du fer, d'abord à l'échelle microscopique

* A l'inverse, cet ordre est peu modifié dans les sols rouges éclaircis et allégés par l'effet de la culture.

sans variation de la teneur globale (ferri-argilanes zonés) puis au niveau des horizons pédologiques (marquée par une discordance du fer et de l'argile visible sur la fig. 7-1) et enfin à celui des profils eux-mêmes (déferrifiés dans leur ensemble en ce qui concerne les sols beiges). Dans ce domaine, les effets de la réorganisation du matériau argileux sont d'abord limités aux assemblages directement atteints, mais tendent à se généraliser dès lors que les perturbations modifient le fonctionnement hydrique de l'ensemble du sol (gagnant alors les horizons B 2 et B 3 qui n'étaient pas initialement atteints par l'ultradessiccation).

Cette disjonction du fer et de l'argile se répercute elle-même sur l'état du squelette puisqu'une partie du fer libéré s'incruste dans les fissures du quartz et provoque la fissuration des grains dont les fragments sont ultérieurement disjoints lors de la dissolution des ciments ferriques.

3/ - Aperçu général sur la dynamique du phénomène.

Il convient maintenant de reconstituer l'enchaînement des mécanismes mis en cause.

L'évolution du sol dépend ici de l'état d'association des constituants du plasma (fer et argile qui semble se modifier de la façon résumée dans le tableau 13-4.

On constate ainsi qu'interviennent différents mécanismes qui s'enchaînent ; chacun d'eux créant les conditions nécessaires au déclenchement du suivant. Néanmoins, un élément apparaît comme tout à fait fondamental ; c'est le seuil qui se situe au niveau du sol de transition et qui correspond à une limitation du drainage vertical.

En effet, à partir de ce seuil, l'évolution des sols beiges est dominée par une hydromorphie secondaire de plus en plus généralisée, responsable de la disjonction irréversible du fer et de l'argile.

Un tel fait suggère que l'on passe alors d'un domaine dans lequel la dynamique de l'eau est caractérisée par une dominance de flux vertical, à un autre ou, par suite d'une limitation du drainage se développent des engorgements et s'amorce un écoulement latéral subsuperficiel. Envisageant la question sous cette forme, nous abordons le problème de la propagation des sols beiges.

Tableau 13-4.

VARIATIONS SUCCESSIVES DE L'ETAT D'ASSOCIATION DU FER ET DE LA KAOLINITE DANS LA TOPOSEQUENCE.

ASSOCIATIONS FER KAOLINITE ET LEURS MODIFICATIONS	SOLS	ORGANISATIONS MICROMORPHOLOGIQUES
OXY-HYDRATES DE FER — ARGILE Fe_2O_3 | KAOLINITE | Fe^{3+}		micronodules (assemblages tridimensionnels stables, particules immobilisées, absence de gonflement et de retrait)
actions mécaniques ultradessiccation + réhumectation ruptures de liaison, réversibles-retrait (et gonflement) - contraction	ROUGE	
Fe_2O_3 | KAOLINITE | Fe^{3+}		argilanes rouges, peu différenciés partiellement réincorporés à la structure micronodulaire
Préhydromorphie due à l'effondrement de l'assemblage déferrisation - activation de l'argile		
Fe_2O_3 | KAOLINITE	DE TRANSITION	Plasma jaune rouge mobilisable, gonflement et retrait, formation de séparations plasmiques et de fissures dans un plasma continu
Hydromorphie induite au niveau des discontinuités - disjonction fer - argile.		
Fe_2O_3 | KAOLINITE		ferri-argilanes zonés formés par réorientation, avec ou sans déplacement
Hydromorphie due au changement de fonctionnement hydrique du sol - indépendance et redistribution		
Fe_2O_3 — KAOLINITE	BEIGE	Plasma beige, plus ou moins décoloré, taches et pseudogley

B - LES MODALITES DE LA PROPAGATION DES TRANSFORMATIONS : LES DEUX GRANDES VOIES DE L'EVOLUTION DES SOLS ROUGES.

Deux évolutions différentes des sols rouges ferrallitiques ont été reconnues et étudiées au cours de ce travail :

- La première est caractérisée par la formation de sols colmatés à profils différenciés, peu épais, qui se propagent à partir des zones planes des plateaux selon un "front de digestion" des sols rouges, particulièrement dans la région de moyenne Casamance, très arrosée durant la saison des pluies, mais soumise durant les mois de février, mars et avril à des incursions d'air très sec d'origine continental ("harmattan") par suite des oscillations du front intertropical. La déforestation, qui supprime l'écran protecteur des arbres et accroît les possibilités de dessiccation, est susceptible d'en provoquer les premiers stades. Elle trouve son aboutissement dans la formation de sols "beiges", de type "ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions", étudiés par MAIGNIEN (1961).

- La seconde se manifeste de façon graduelle par l'existence d'horizons supérieurs plus sableux et moins riches en constituants du plasma (kaolinite et fer) que les horizons B rouges et homogènes qu'ils surmontent. Elle s'intègre donc dans le cadre général du phénomène d'appauvrissement, défini par FAUCK (1972), qui se développe inégalement :

  . suivant la latitude (s'accentuant du sud au nord à mesure que l'on passe du climat sub-guinéen de basse Casamance au climat sahelo-sénégalais du Sine-Saloum, caractérisé par des précipitations moindres et par des variations journalières et annuelles plus fortes de l'humidité relative,

. et suivant l'état de la couverture végétale (il est intensifié par la déforestation, due à l'action de l'homme, dans les situations les plus favorables au drainage vertical).

Nous examinerons successivement ces deux voies.

1/ - La propagation des sols beiges en Casamance.

Cette propagation sera d'abord envisagée de façon linéaire dans le cadre de la toposéquence sous forêt.

Le développement dans le temps sera ensuite étudié en se référant à l'évolution des sols rouges sous culture.

La propagation à l'échelle des paysages, enfin, sera analysée à partir des données cartographiques.

a) Propagation linéaire dans le cadre de la toposéquence sous forêt.

α) Les modalités de la propagation.

- Fonctionnement du sol rouge.

. Nous savons maintenant que les effets de l'ultradessiccation s'exercent de façon différente selon que la charpente du matériau est assurée par des grains de quartz ou par les micronodules. Par ailleurs, nous avons vu que la structure micronodulaire facilitait le maintien dans le sol rouge, en saison sèche, de l'eau occupant les vides intramicronodulaires (autorégulation).

. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que l'ultradessiccation ne puisse affecter chaque année, dans les sols rouges, que des profondeurs faibles et relativement constantes et qu'elle se manifeste ainsi surtout dans les horizons A et AB à dominance sableuse.

. Comme l'effet exercé sur la vitesse de percolation est faible, l'action porte principalement sur la dissociation des micronodules, dont les produits sont alors facilement entraînés jusqu'à la base du profil par un flux vertical, pratiquement illimité en saison des pluies. Ainsi s'expli-

querait la généralité du processus "d'appauvrissement" dans les sols rouges, qui correspondrait en fait à un lessivage vertical mais lointain.

. Des exportations comparables d'argile, à plus de 2 mètres de profondeur, ont été observées après chaque saison sèche, à partir des sols sablo-argileux reconstitués dans les cases lysimétriques de Bambey (CHAUVEL et CHARREAU, 1972).

- Dès qu'on passe au sol rouge jaune, il apparaît, dans la couche plus profonde (jusqu'à 80 centimètres), fortement exploitée par les racines et qui correspond à l'horizon "de comportement", un régime hydrique contrasté. Celui-ci provoque la dislocation de la structure, ce qui accroît la compacité et la continuité du fond matriciel. Une telle évolution favorise alors une pénétration plus profonde de l'ultradessiccation, qui gagne progressivement l'ensemble de l'horizon, dont elle "démasque" progressivement l'argile, libérant totalement les possibilités de retrait puis de gonflement ultérieur et provoquant ainsi une étanchéisation croissante de l'horizon. On arrive bientôt à ce qu'on a appelé le sol de transition.

- Dans ce cas intervient, à ce moment-là, un seuil à partir duquel le flux vertical de la saison des pluies se trouve limité et tend à disparaître, tandis que l'entraînement de l'argile issue des horizons superficiels est arrêté au niveau des horizons AB (variations en marches d'escalier de l'argile granulométrique - cf. chapitre 6) et B 1 (argilanes localisés sur les parois des vides grossiers fissuraux - cf. chapitre 9). Il se produit alors un colmatage qui va de pair avec une forte diminution de la macroporosité dans l'horizon B 1.

. Une telle limitation de l'écoulement vertical se répercute immédiatement dans les horizons B 2 et B 3 dont l'humectation se fait alors par des voies préférentielles, c'est-à-dire de façon irrégulière et hétérogène. Or, ceci a pour conséquence de développer une certaine hydromorphie

induite qui provoque à son tour une déferrisation de l'argile et par la même, la dissociation des assemblages tridimensionnels. A partir de là, le matériau de ces horizons devient très vulnérable à l'ultradessiccation qui s'y développe en atteignant d'ailleurs sa plus forte amplitude (cf. fig. 5-6) et se propage selon un "front" en direction du sol rouge voisin.

. Cette propagation, qui correspond en fait à une transformation de l'assemblage plasmique (et à l'évacuation de l'eau retenue dans les vides intramicronodulaires) s'effectue de façon irrégulière selon les années et dépend des conditions d'aridité extrême propre à chaque saison sèche.*

. Ainsi, à la faveur de périodes pluriannuelles exceptionnellement sèches (telle que celle qui est intervenue récemment), cette évolution semble s'effectuer de façon rapide. Elle correspondrait, en quelque sorte, à une vague d'effondrement partiel d'une structure métastable dans les conditions actuelles d'évolution (celle des sols rouges ferrallitiques soumis à des contrastes pédoclimatiques importants). Les nodules, qui représentent ici la phase résiduelle de l'organisation initiale, sont caractéristiques de ce stade d'évolution. Sitôt individualisés, ils sont à leur tour soumis aux effets de la disjonction du fer et de l'argile, premier indice d'une nouvelle phase pédogénétique qui conduit à la formation des sols beiges.

- Au départ, c'est alors l'aptitude au gonflement des constituants du plasma, leur mobilité et leur tendance à se disjoindre en composés ferrifères et en kaolinite, ainsi que l'hétérogénéité des horizons B 2 et B3, qui détermine l'orientation des processus évolutifs. Il se produit par exemple une redistribution de l'argile dans les horizons A et AB (de plus en plus fortement et profon-

* On peut s'expliquer de cette manière l'absence d'un état hydrique stationnaire de référence dans le sol de transition.

dément éluviés) et B 1 (où apparaît un maximum d'accumulation d'argile).

. Cette différenciation accrue a pour effet :

+ de limiter le drainage profond et de créer des niveaux d'engorgement subsuperficiels, à partir desquels semble s'amorcer un écoulement latéral sporadique,

+ de réduire les possibilités d'évaporation et la dépendance de l'état de dessiccation du sol par rapport aux conditions atmosphériques (commandé par les variations de la conductivité hydraulique dans chaque horizon).

Dans ces conditions tend à se définir au cours des saisons sèches un état hydrique stationnaire en relation avec la différenciation du profil pédologique.

+ Ainsi, l'horizon B 21 se trouve porté, presque chaque année, à des humidités inférieures au point de flétrissement. Or, c'est précisément en son sein que les nodules acquièrent une organisation concentrique, s'entourent d'un cortex et forment des "concrétions". Il semble donc que cette évolution soit une conséquence de l'ultradessiccation* .

+ Dans les horizons B 22 et B 3 sous-jacents, à peine atteints par l' "ultradessiccation", les discontinuités dans la porosité et l'existence de contacts tranchés entre éléments différenciés (nodules et fond matriciel), hérités du sol de transition, font obstacle à la diffusion de l'eau

---

* Cette hypothèse s'accorde avec les conclusions de DROSDOFF et NIKIFOROFF (1940) qui suggèrent la possibilité d'une ségrégation du fer et du manganèse par l'effet des forces physiques qui s'exercent dans le sol au cours de la dessiccation. Une explication semblable a été retenue par BOCQUIER (1973) et BOULET (1974).

et créent des engorgements localisés au niveau desquels se produit une disjonction du fer et de l'argile, suivie d'une redistribution et d'un départ partiel des constituants ainsi libérés. L'organisation qui en résulte présente les caractéristiques d'un horizon de pseudogley. Les nodules tendent à s'y estomper progressivement et sont par la suite mélangés au fond matriciel par l'activité de la faune.

. Ces transformations qui aboutissent à l'individualisation du sol beige, correspondent à des réorganisations, aussi bien à l'échelle des assemblages qu'à celle des horizons et du profil pédologique. Elles se manifestent de façon graduelle dans la toposéquence, comme si le temps qui leur est nécessaire pour arriver à un nouvel état d'équilibre était important.

Cet ensemble d'informations a été consigné de manière synthétique dans les figures 13-5 et 13-6.

En conclusion, il apparaît que si la propagation de la différenciation pédologique s'effectue des sols beiges vers les sols rouges, les transformations qui en sont responsables se réalisent dans le sens inverse.

β) Conséquences sur l'évolution géomorphologique.

Des variations de la topographie accompagnent ces transformations: ainsi les pentes faibles (et le relief convexe) caractérisent les sols rouges, elles s'accentuent dans la zone de transition et deviennent de plus en plus faibles dans les sols beiges (à une cote inférieure de quelques mètres à celle des sols rouges).

Tout se passe donc comme si le tassement de la structure micronodulaire initiale et les départs de constituants étaient la cause de cette évolution du modelé.

D'ailleurs une évaluation approximative du tassement consécutif à la transformation du sol rouge en sol beige peut être réalisée à partir des seules teneurs volumiques en quartz (cf. chapitre 8 B, fig. 8-3 et chapitre 9)

SOL ROUGE TYPIQUE - SOL ROUGE JAUNE - SOL DE TRANSITION - SOL BEIGE ROSE - SOL BEIGE - SOL BEIGE HYDROMORPHE

BASCULEMENT

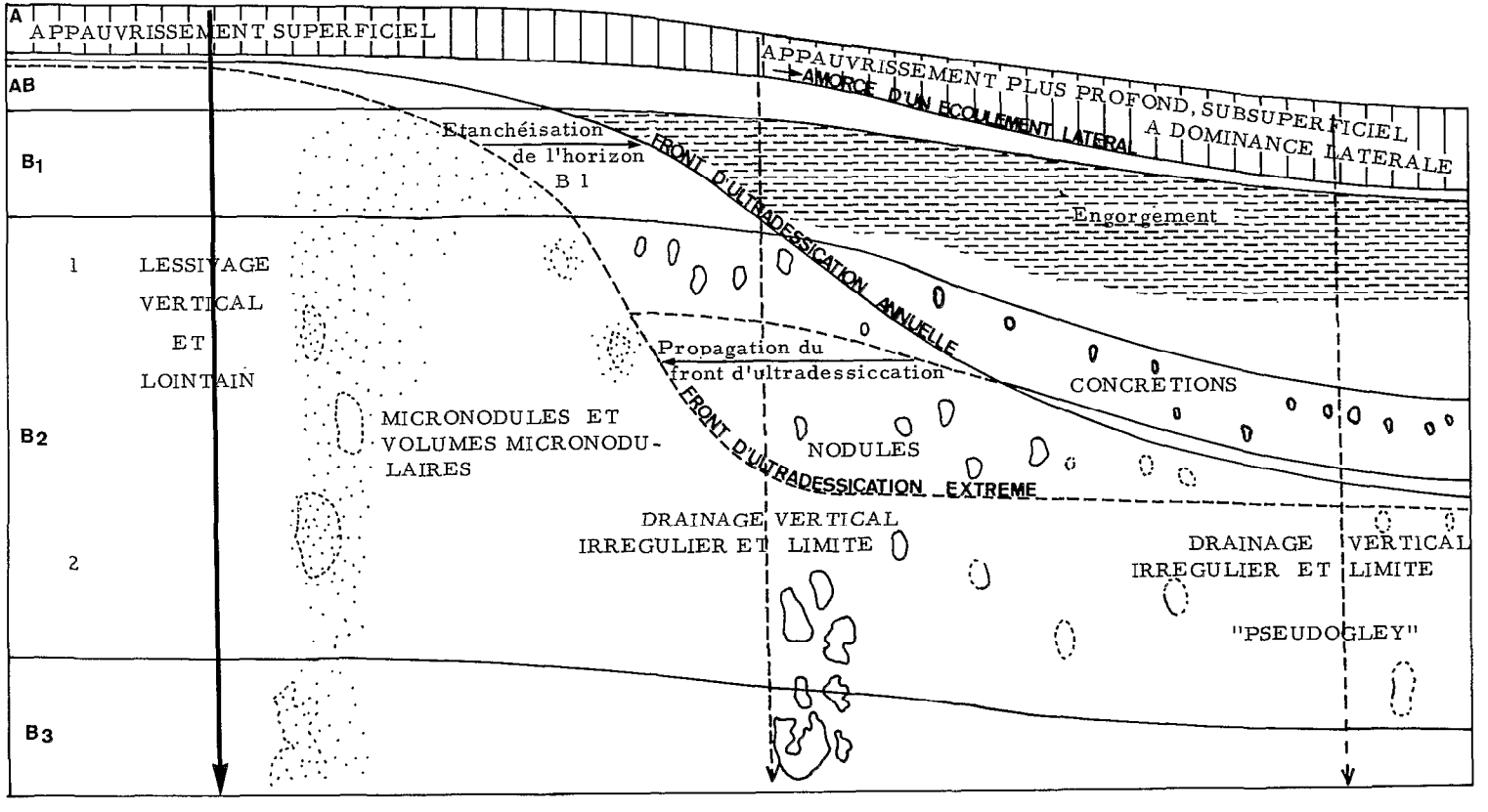


Fig. 13-5 - Propagation des sols beiges dans la toposéquence.

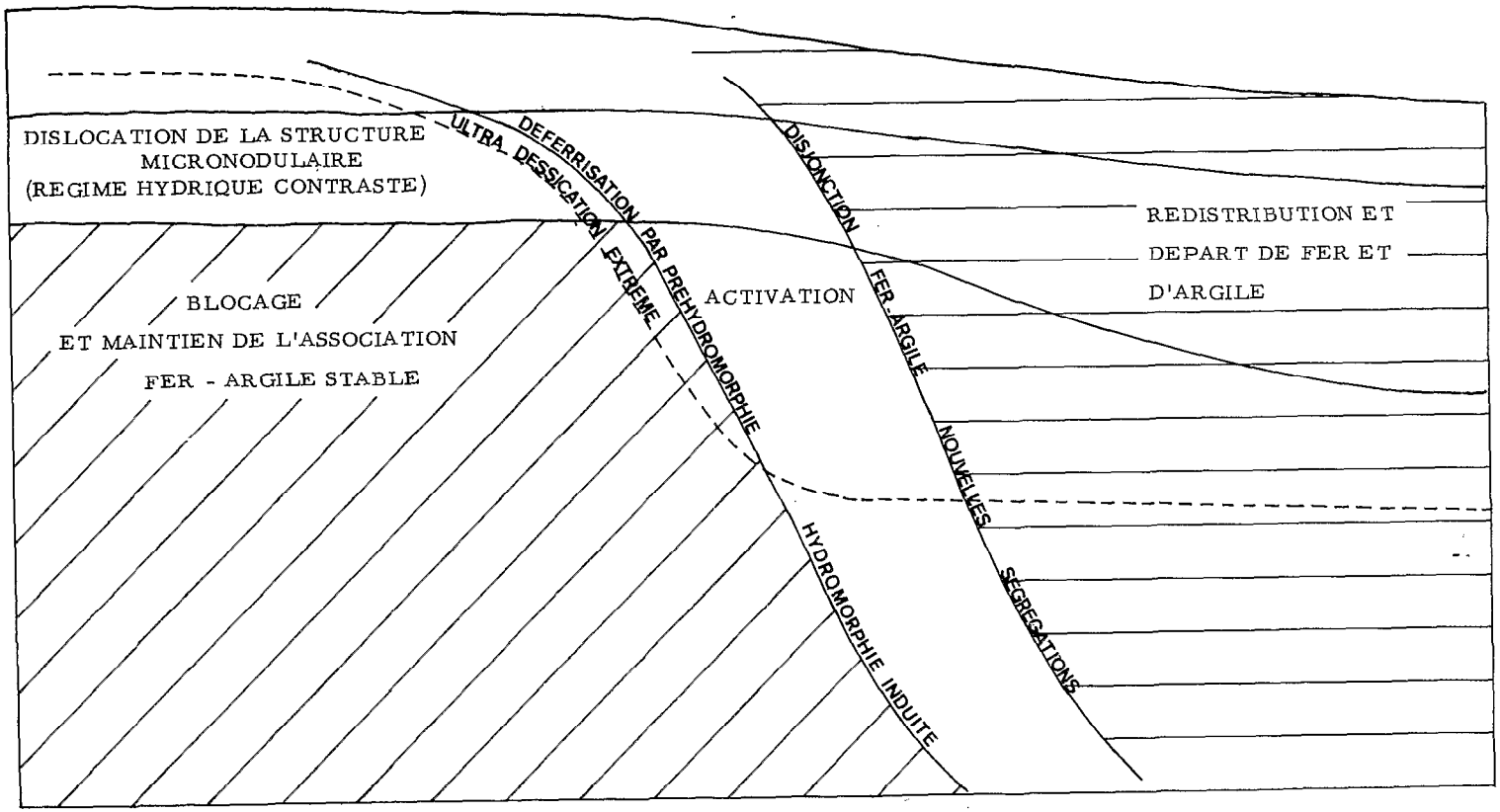


Fig. 13-6 - Développement de l'hydromorphie et de la disjonction du fer et de l'argile dans la toposéquence.

et en supposant qu'aucune perte appréciable de ce constituant n'intervienne au cours de l'évolution.

+ Dans les horizons A et AB, à des variations faibles des volumes occupés par le squelette quartzeux correspondent des tassements peu importants.

+ La teneur volumique en quartz de l'horizon B 1 passe sensiblement de 32 % dans le sol rouge à 43 % dans le beige. Si l'on admet que le second sol dérive du premier, le volume initial correspondant à son unité de volume actuel était de : $\frac{43}{32} = 1,34$ et le tassement correspond alors sensiblement au 1/4 de sa hauteur.

+ Les teneurs volumiques globales en quartz dans les horizons B 2 et B 3 sont de l'ordre de 25 % dans le sol rouge et de 37,5 % dans le beige. Le même calcul indique alors que le tassement porte sensiblement sur 1/3 de la hauteur affectée par la transformation.

La conséquence de cette transformation se traduit donc par une modification du modelé (fig. 13-7). Celle-ci est d'abord réduite tant que la transformation n'affecte que les horizons A, AB et B 1, puisqu'elle est limitée au 1/4 de la profondeur de ces derniers, soit à près de 1 décimètre. Ainsi les "taches" d'ultradessiccation affectant le sol rouge, manifestée par le développement de nuances jaunes, apparaissent sous forme de "microcuvettes"* mises en évidence par le lever topographique (profondeur de l'ordre du décimètre, diamètre de quelques décamètres).

A cette évolution s'ajoute l'imperméabilisation relative des horizons B 1. En l'absence de pente et d'exutoire pour les eaux en période de forte précipitation, il se crée à ces emplacements des engorgements responsables d'une hydromorphie secondaire ou induite, comme cela est

---

* De telles "microcuvettes" ont été reconnues et décrites lors de l'observation des sols (cf. chapitre 5).

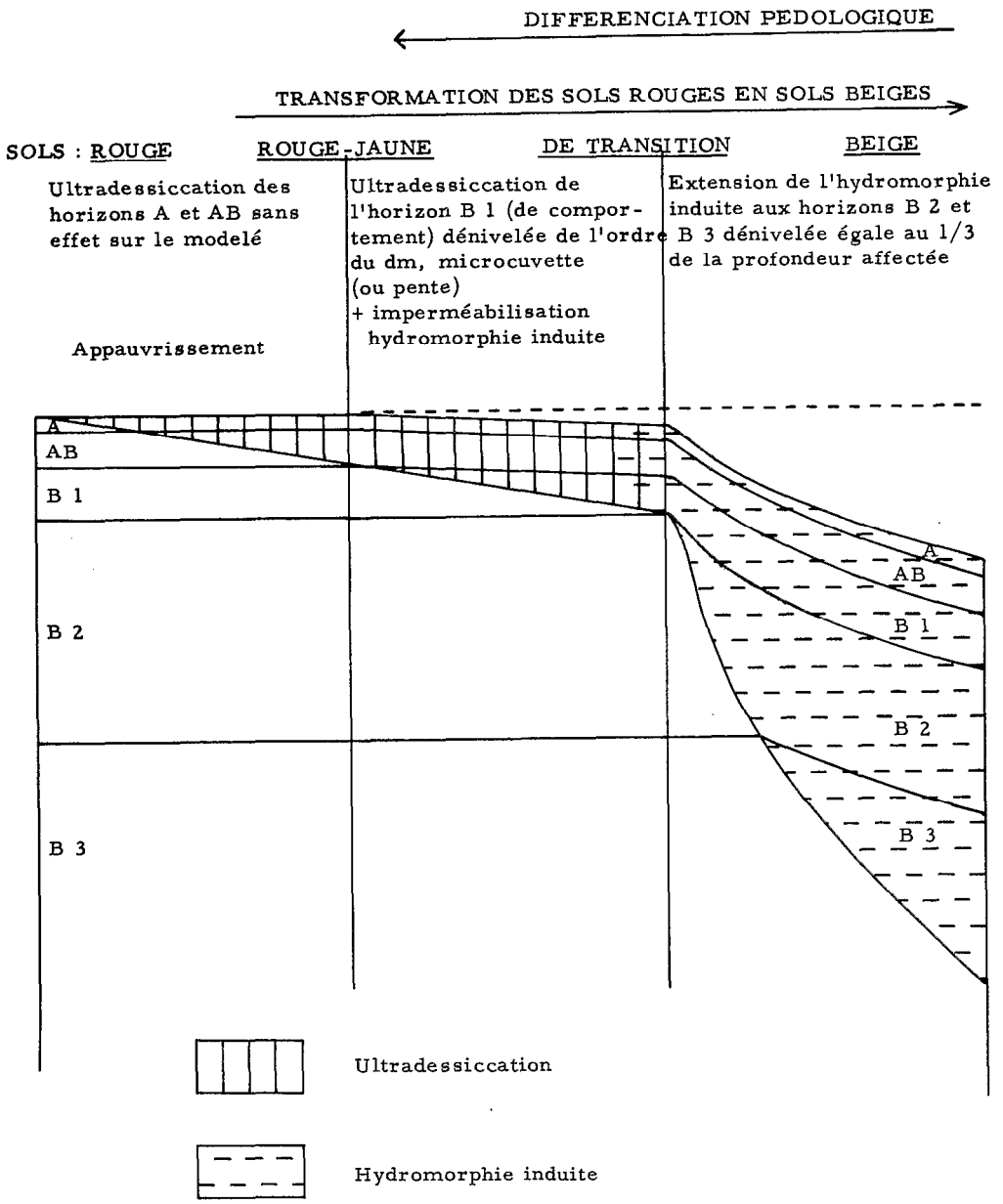


Fig. 13-7 - Intervention du tassement au cours de la différenciation du sol beige.

indiqué sur la figure 13-8.

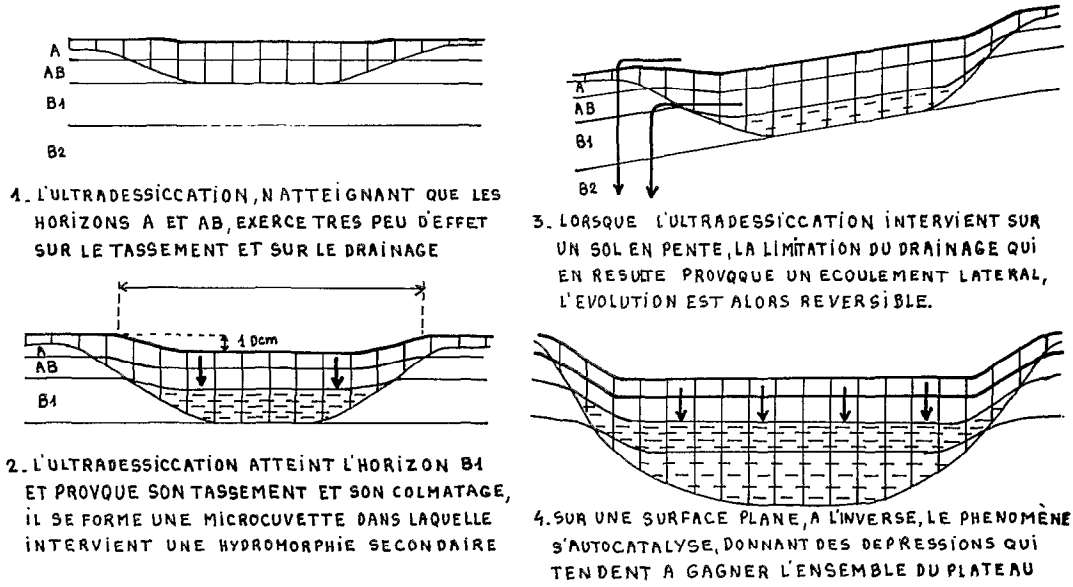


Fig. 13-8. Formation et évolution des "microcuvettes".

Lorsque cette hydromorphie se propage dans les horizons profonds (alimentés en eau par des voies préférentielles), il en résulte un tassement égal au 1/3 de la hauteur affectée. Les microcuvettes font place ici à de plus larges dépressions formées au centre du plateau, là où la pente est nulle et les possibilités d'écoulement latéral sont très réduites (cette évolution est représentée schématiquement sur la figure 13-8). Les matériaux pédologiques y sont alors soumis à des alternances de dessiccations et d'engorgement qui accélèrent le processus de destruction des assemblages tridimensionnels (par action de gonflement et de retrait). Ainsi s'autocatalyse l'hydromorphie secondaire qui tend à gagner l'ensemble du plateau.

Les phénomènes se poursuivraient de cette manière si aucun exutoire ne se formait, qui soit capable d'évacuer l'eau libre accumulée dans les horizons superficiels en période de forte pluie. Mais les failles affectant le substratum y constituent des discontinuités et des sections de moindre résistance ; aussi est-ce selon leur axe que l'écoulement peut s'amorcer de façon préférentielle en creusant progressivement des chenaux qui sont

alimentés de façon discontinue lors des fortes pluies ; leur fonctionnement donne en définitive naissance aux vallées latérales qui gagnent les principaux cours d'eau. Nous reviendrons sur cette question dans le paragraphe relatif à la propagation dans l'espace des phénomènes.

Les filiations observées nous ont permis de transposer à l'échelle du temps des variations observées selon l'axe d'une toposéquence et de supposer ainsi l'existence d'une propagation. Une approche chronologique devrait permettre d'apprécier le bien fondé de cette hypothèse.

b) Evolution dans le temps (séquence d'évolution des sols rouges cultivés à colmatage).

Nous savons que le défrichement et la mise en culture provoquent le développement de l' "ultradessiccation" dans les sols rouges jusqu'à la base de l'horizon B 1.

Il en résulte, comme nous l'avons vu, une transformation des horizons atteints, manifestée par des caractères morphologiques et analytiques (couleur, texture, structure, compacité...), qui peut s'orienter de deux façons différentes.

Celle qui nous intéresse ici se produit lorsque les conditions de drainage sont moins favorables et l'ultradessiccation plus brutale ; elle provoque en quelques années une libération importante d'argile (préalablement immobilisée au sein des micronodules) dans l'horizon B 1, qui se nuance de jaune et devient compact. Dès que cette première évolution est réalisée (10 à 20 ans après le défrichement), les horizons B 2 et B 3 (non soumis cependant à l'ultradessiccation ou à des engorgements importants) s'éclaircissent, tandis que s'y différencient des nodules entourés de petites taches blanches ponctuelles, semblables à ceux observés dans le sol de transition, indices d'une hydromorphie induite par l'évolution des horizons supérieurs.

Le sol parvient donc, en 10 à 20 ans, à un état comparable à celui des sols de transition, et ceci semble-t-il, par l'enchaînement des mêmes processus.

Les variations qui suivent cette première phase d'évolution sont peu perceptibles et surtout marquées par une accentuation progressive de la

différenciation des horizons superficiels. Aussi les profils observés après 90 ans de culture sont-ils encore beaucoup plus proches des sols de transition que des sols beiges. Deux explications peuvent alors être proposées :

- l'évolution par l'effet de la culture diffère par son intensité de celle qui intervient dans la toposéquence sous forêt, aussi est-elle incapable de conduire au sol beige ;
- les réorganisations qui succèdent à la phase rapide "de transition" nécessitent une durée très supérieure à celle du siècle et l'évolution vers le sol beige serait actuellement en cours, après les modifications irréversibles réalisées lors des premières années de culture.

L'échelle de temps habituellement nécessaire au développement des organisations pédologiques nous incite à considérer la deuxième hypothèse comme étant la plus plausible.

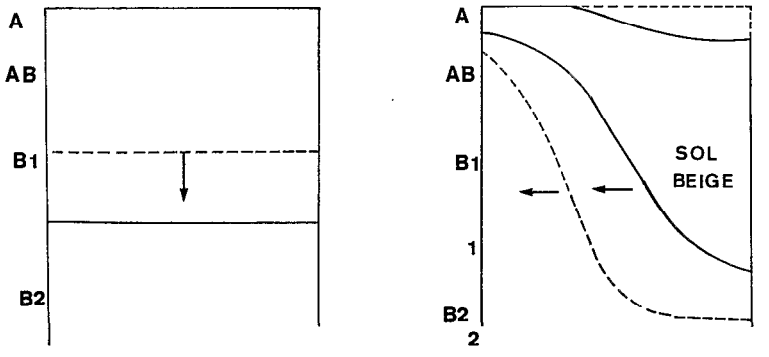
Ainsi, à la disproportion entre la largeur de la frange occupée par le sol de transition et celle des vastes zones couvertes de sol beige, correspondrait celle de la durée très brève (10 à 20 ans) nécessaire au passage du sol rouge au sol de transition, et du temps plus long qui permettrait à ce dernier d'acquérir les caractères de différenciation propres au sol beige

x

x x

La principale différence entre les transformations observées sous forêt et celles provoquées par la mise en culture semble ainsi tenir à la direction de l'évolution et au régime de la propagation, comme cela est indiqué, de façon schématique, sur la figure 13-10.

Si l'équilibre du sol rouge est effectivement métastable, on est conduit à se demander pourquoi le sol de transition ne se propage pas très rapidement sur l'ensemble de la surface. Il apparaît, en fait, que sa vitesse de propagation est ici dépendante de la différenciation des sols beiges à partir desquels il se développe par déplacement latéral du gradient hydrique de dessiccation à la faveur des cycles d'années sèches.



CULTURE

Battement annuel du front d'ultradessiccation jusqu'à la base de l'horizon B 1.

TOPOSEQUENCE SOUS FORET

Propagation latérale du gradient hydrique de dessiccation, à la faveur de périodes arides, à partir des limites atteintes par les sols beiges.

Fig. 13-9 - Comparaison de la propagation de l'ultradessiccation et des transformations qui en résultent, dans les sols cultivés et dans la toposéquence sous forêt.

C'est donc ici l'ensemble de la séquence, depuis les sols de transition jusqu'aux sols beiges, qui gagne et digère progressivement la zone des sols rouges, marquée par un faible effondrement, puis par une rectification de la surface topographique.

Il convient maintenant d'examiner cette évolution dans le cadre spatio-temporel de l'unité paysagique.

c) Propagation à l'échelle du paysage.

En se fondant sur un ensemble de données, et plus précisément sur:

- les faits précédemment établis et les conclusions que l'on en a tirées au sujet :
  - . de la propagation linéaire des sols beiges en Casamance
  - . du tassement qui en résulte et de ses conséquences;
- les connaissances relatives à la géologie et à la géomorphologie (cf. chap. 1 p. 9 et 23);
- la distribution actuelle des sols telle qu'elle apparaît sur les

cartes pédologiques (cf. fig. 1-2 et fig. 3-1) et particulièrement sur l'extrait de la carte de moyenne Casamance à l'échelle du 1/200. 000 dressée par TOBIAS (fig. 13-11. A); il est possible de proposer une reconstitution dans le temps, pédologique et géomorphologique, sachant toutefois que celle-ci n'a qu'une valeur interprétative et qu'il conviendra de la reconsidérer chaque fois qu'une précision supplémentaire sera apportée.

Cette reconstitution est exprimée sous forme d'une série de cartes (fig. 13 -11) et de coupes correspondantes (fig. 13 -10) représentant les étapes successives de l'évolution du paysage.

- La carte et la coupe A correspondent à l'état actuel d'un plateau situé en bordure de la Casamance à l'est de Sedhiou.

On y distingue :

. une auréole de reliefs discontinus à profil convexe occupés par les sols "rouges",

. une partie centrale couverte par les sols "beiges de plateau",

. une frange étroite de "sols de transition" (séparant les précédents) marquée par une pente,

. des vallées latérales dont la tête se situe au niveau des sols beiges

. des versants qui supportent des sols "beiges de pente" remaniés, et localement, là où des niveaux indurés sont mis à jour, des sols peu évolués sur matériaux de démantelement de cuirasse.

- La carte et la coupe B indiquent un état futur prévisible.

La différence avec l'état actuel y est marquée :

. surtout par la propagation des sols beiges de plateau aux dépens des sols rouges qui ne sont plus représentés que sur la périphérie *

. de façon moins apparente par le développement des sols "beiges de pente" remaniés qui gagnent sur les sols beiges de plateau.

---

* Une disposition semblable est observée plus au nord, dans la région de Koumpentoum où l'on retrouve des reliques de sol rouge à la périphérie des plateaux.

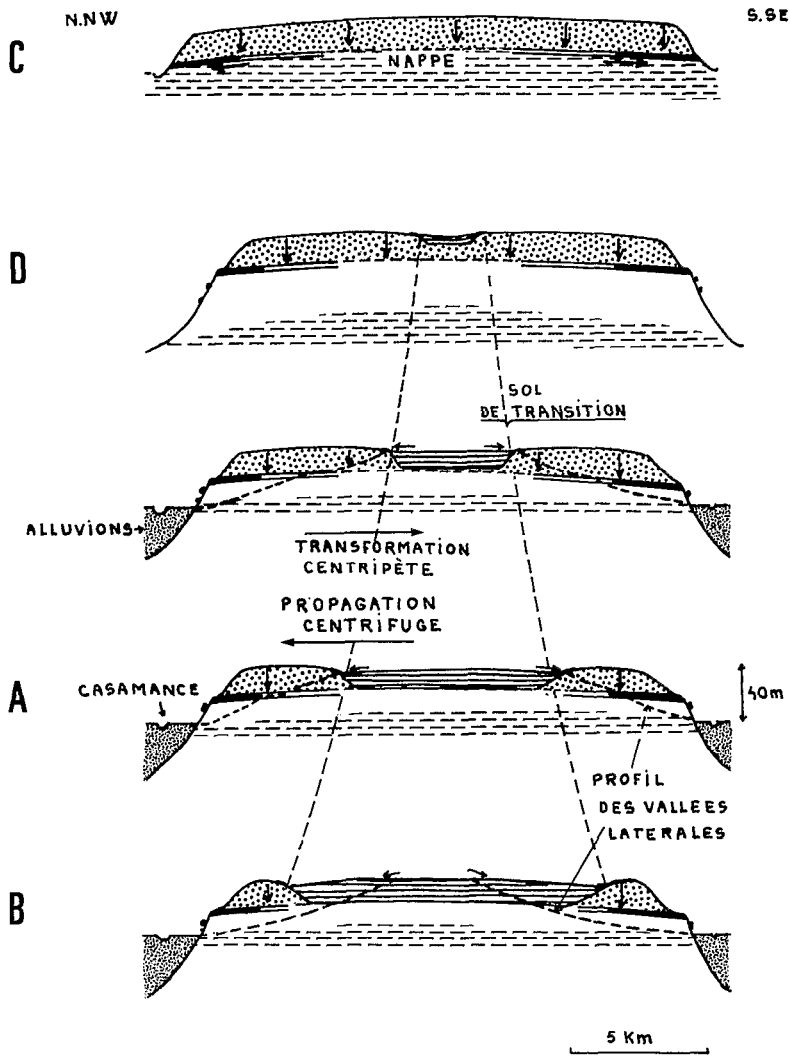
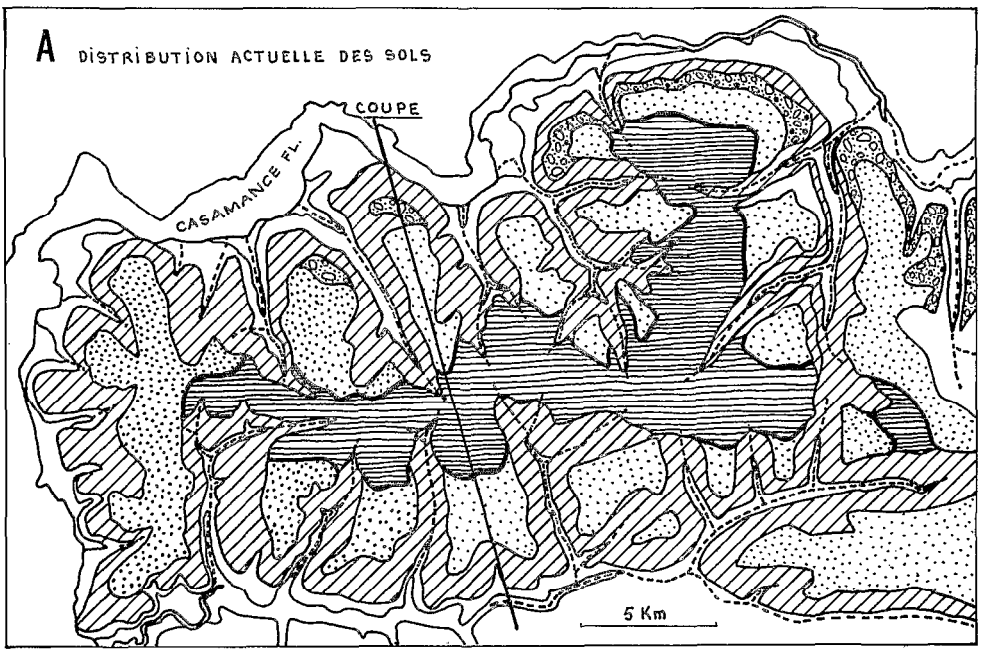
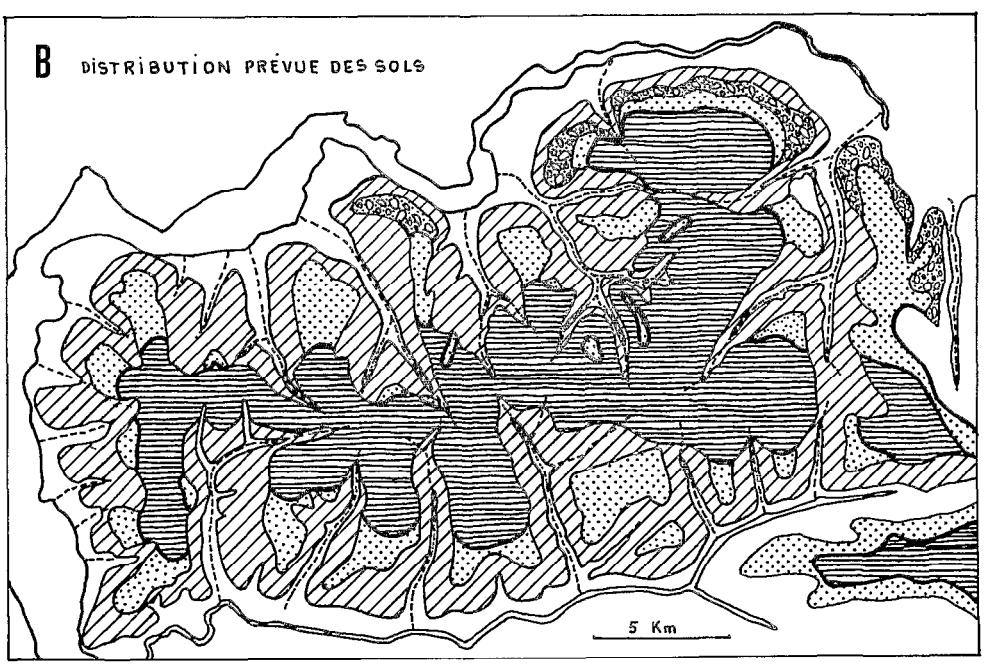


Fig. 13-10 - Etapes successives supposées de l'évolution d'un plateau de moyenne Casamance vues en coupe (cf. fig. 13-11. A).





SOLS ROUGES

SOLS "BEIGES DE PENTE"

SOLS "BEIGES DE PLATEAU"

SOLS PEU EVOLUES SUR MATIERE DE DEMANTELEMENT DE CUIRASSE.

SOLS "DE TRANSITION"

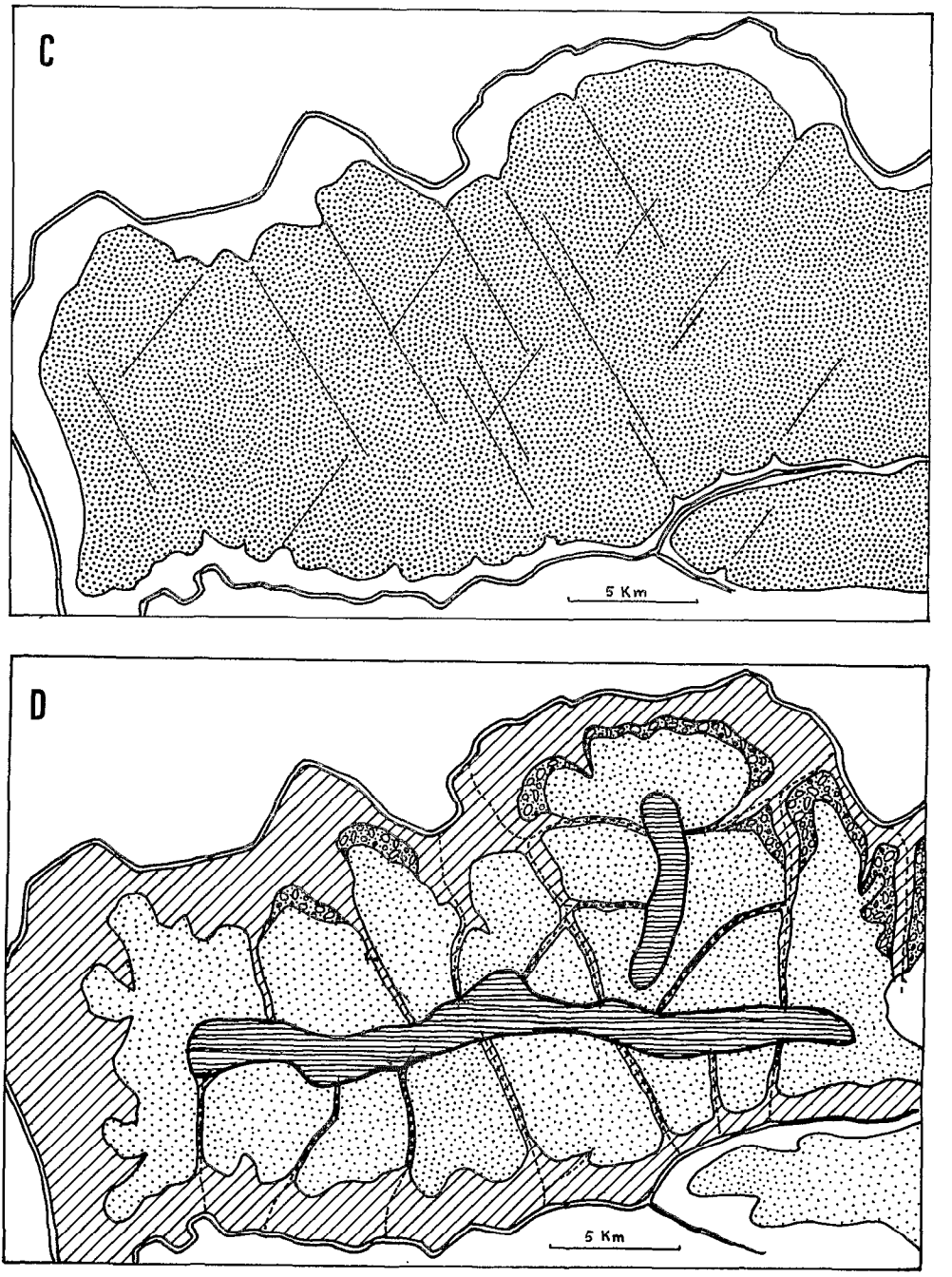


Fig. 13-11 - Etapes successives supposées de l'évolution d'un plateau de Moyenne Casamance (cartes).

- La carte et la coupe C représentent un état passé lointain supposé :
  . des sols ferrallitiques profonds recouvrant alors tout le plateau,
  . des systèmes de failles, orientés selon deux directions préférentielles (cf. fig. 1-4) constituent des discontinuités au sein du substratum gréso-argileux et des niveaux indurés
  . le tracé du fleuve et de ses affluents, influencé par ces accidents tectoniques, délimite la surface du plateau.
- La carte et la coupe D décrivent un passé plus récent :
  . des sols beiges se développent à partir du centre du plateau, constituent des zones légèrement déprimées,
  . un écoulement alimente de petits cours d'eau dans les thalwegs qui se forment suivant le réseau de failles,
  . le fleuve et ses affluents creusent profondément leurs vallées et en étendent les versants sur lesquels se développent des sols "beiges de pente" remaniés, ils mettent à jour des niveaux indurés qui sont à l'origine des matériaux de démantelement de cuirasse.
  . les sols rouges occupent les surfaces convexes, ainsi dégagées de toutes parts.

Les modifications décrites peuvent être expliquées de la façon suivante :

- A l'origine (carte et coupe C) se développe, sous un climat humide, à partir d'une épaisse frange d'altération ("continental terminal") et sur toute la surface du plateau, un sol rouge ferrallitique profond. Un drainage vertical, alimente alors une nappe en équilibre (niveau hydrostatique), à 15 à 20 mètres de profondeur, (près de 30 mètres au dessus du niveau actuel de la mer).
Cette nappe est soumise à un écoulement latéral, le niveau qui lui correspond tend à s'indurer.
Par la suite, de petits mouvements sont à l'origine de la formation des systèmes de failles.
- Intervient alors une phase plus aride en même temps qu'une régression du niveau de la mer (carte et coupe D).
  . L'ultradessiccation, dépendante des conditions climatiques, provoque alors la formation de sols beiges au centre du plateau, sur des surfaces légèrement déprimées par

l'effet du tassement. La limitation du drainage vertical entraîne la formation d'engorgements. L'évacuation de l'eau libre s'effectue alors de façon préférentielle selon les discontinuités qui correspondent aux failles, formant de petits thalwegs soumis à un écoulement sporadique.
Simultanément, l'abaissement du niveau de base provoque le creusement de la vallée et l'extension des versants sur lesquels une nouvelle pédogénèse intervient, en relation avec un climat dont l'aridité augmente, responsable de la formation de "sols beiges de pente". Il met aussi à jour les niveaux indurés qui sont à l'origine des matériaux de démantèlement de cuirasse.

- La situation à l'époque actuelle (fig. et coupe A) résulte à la fois:
  . de l'autodéveloppement des sols beiges de plateau qui continuent à se propager aux dépens des sols rouges.
  . du creusement des vallées latérales (d'autant mieux alimentées en eau que le colmatage tend à se généraliser).
  . de la remontée du niveau marin et donc de l'alluvionnement dans la vallée du fleuve et de ses principaux affluents.
- L'évolution prévisible (carte et coupe B) correspond :
  . à la poursuite de l'extension des sols beiges de plateau aux dépens des sols rouges, ne laissant subsister que de petites reliques périphériques.
  . Au développement des vallées latérales et de leurs versants, occupés par des sols beiges de pente formés sur des matériaux remaniés.

Ainsi l'autodéveloppement de la transformation des sols rouges en sols beiges semble conduire à une modification importante du paysage, tant d'un point de vue pédologique que géomorphologique.

En tenant compte des travaux des géologues et des géographes (ELOUARD et FAURE, 1967) et des résultats plus récemment acquis en basse Casamance (VIEILLEFON, 1974), il serait possible de proposer une datation pour les différentes phases de cette évolution :

- la période la plus aride au cours de laquelle aurait pu s'amorcer la formation de sols beiges de plateau correspondrait à l'Ogolien (20. 000 ans B. P. ?).

- après 17. 000 ans B. P., une transgression importante s'accompagne d'une évolution vers un climat plus humide et se poursuit jusque vers 7 000 à 6 000 ans B. P.. L'évolution aurait pu être marquée durant ce temps par un ralentissement du processus, en l'absence de périodes de dessiccation.
- l'évolution subactuelle, depuis 4 000 ans, résulterait d'un ralentissement de la remontée du niveau de la mer, mais aussi de légères fluctuations du climat vers l'aride; elle pourrait se traduire par un développement plus accentué des sols beiges.

En conclusion, cette approche nous permet de compléter ce qui a été dit précédemment, à partir des seuls résultats de l'étude linéaire effectuée selon l'axe des toposéquences. Plutôt qu'une évolution d'aval en amont, c'est bien ici une différenciation centrifuge et une transformation centripète qui caractérisent la propagation des sols beiges sur les plateaux de moyenne Casamance.

2/ - L'individualisation des sols sableux au Sénégal sur les matériaux du "Continental terminal".

A l'inverse de ce qui se produit avec les sols "beiges" de Casamance, aucune limite nette ne marque ici la frontière entre les sols rouges ferrallitiques et les sols "Dior" sableux. Il s'agit bien plutôt d'une variation continue de la texture, marquée par une raréfaction progressive de l'argile, qui affecte d'abord les horizons les plus superficiels, puis gagne progressivement l'horizon B (jusqu'à près de 1 mètre de profondeur), et atteint ensuite, de façon diffuse, la partie inférieure du profil.

a) Les variations dans l'espace

Elles sont sensiblement latitudinales dans la partie occidentale du Sénégal où l'importance des contrastes climatiques est plus ou moins tempérée par une influence océanique *

---

* Plus à l'est, sous un climat continental, les sols beiges de plateau et les affleurements de cuirasse deviennent dominants.

La transition entre les sols rouges ferrallitiques et les sols "Dior" sableux y est surtout évidente dans la région du Sine Saloum, étudiée par PIERI (1969) et BERTRAND (1971). Ce dernier décrit en effet des sols rouges sableux, qu'il considère comme intergrades entre les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux tropicaux, formés sur les "matériaux argilo-sableux liés aux plateaux et aux buttes résiduelles". Il observe leur passage à des sols rouges formés sur "buttes dunaires", qui ne se distinguent des précédents que par leur modelé superficiel, indice d'une reprise éolienne orientée selon la direction des vents dominants. Celle-ci ne s'accompagne toutefois d'aucun transport important, puisque ces reliefs dunaires restent sensiblement superposés, ou encore peu éloignés des buttes de sol rouge. Simultanément on observe une variation de la couleur des horizons superficiels qui devient brun rouge à gris rougeâtre.

Quelques dizaines de kilomètres plus au nord, les sols "Dior" sableux se généralisent, recouvrant la plus grande partie de la zone arachidière du Sénégal.

Ce n'est que dans une région plus septentrionale qu'ils laissent place aux sols bruns subarides, étudiés et décrits par BOCQUIER et MAIGNIEN (1963).

b) Les variations dans le temps.

Nous avons déjà constaté que les sols rouges (cf. chap. 3 et 5), situés en bordure de plateau sur des pentes faibles, lorsqu'ils sont cultivés depuis une centaine d'années sont sensiblement plus sableux que ceux maintenus sous forêt dans une position équivalente. On verra plus loin qu'une constation identique a été faite par RAUNET (1971) sur les "terres de Barre" du Togo et du Dahomey. Cet auteur constate toutefois qu'aucune variation significative n'apparaît dans les parcelles cultivées depuis quelques dizaines d'années seulement et que seuls les sites de culture implantés depuis près de 1 siècle permettent d'observer une variation incontestable de la texture des sols. Il s'agit donc ici d'un processus beaucoup plus lent que celui manifesté par l'apparition des caractères morphologiques marquant la transition avec les sols beiges sur les parcelles cultivées de Sefa.

c) Propagation à l'échelle des paysages.

Allant du sud au nord du Sénégal, on constate successivement une évolution vers des sols à texture plus sableuse en surface, puis la formation de rides éoliennes et enfin le développement d'un modelé dunaire, marquant progressivement l'évolution des paysages.

Chapitre 14

RAISONS ET ENSEIGNEMENTS DES PHÉNOMÈNES DE DÉFERRALLITISATION

IMPORTANCE DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTÉES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

Le but de ce dernier chapitre est de rassembler les principales idées exprimées au cours de cette étude :

- afin d'en tirer quelques enseignements généraux sur les processus pédogénétiques mis en cause,
- et également afin de préciser l'extension des zones affectées, en Afrique de l'Ouest.

A - NATURE ET EXTENSION DE LA DEFERRALLITISATION DANS LES ZONES TROPICALES CONTRASTEES.

Nous avons déjà employé le terme de déferrallitisation, mais il faut ici le définir avec précision. Le phénomène qu'il désigne consiste plus spécialement en deux phases :

- la déstabilisation des structures ferrallitiques,
- l'évolution qui en résulte ultérieurement.

1/ - Déséquilibres bioclimatiques et déstabilisation des sols ferrallitiques en climats contrastés.

La notion d'instabilité des sols ferrallitiques a été pressentie par FAUCK (1972) qui constate que "en-dessous de 800 mm, les sols rouges sur grès sont en cours d'érosion et ne subsistent plus que sur les points les plus élevés du modelé". C'est entre 1200 et 1800 mm que, selon cet auteur, l'actualité de l'évolution des profils de sol rouge est la plus probable.

BOULET (1974), quelques années plus tard, introduit le concept d'équilibre et de déséquilibre pédobioclimatique et analyse les conséquences d'une telle situation. Il constate que les couvertures kaoliniques se généralisent et se maintiennent, sur granite, sous des pluviosités supérieures à 1300 mm associées à des saisons des pluies prolongées et à une végétation dense, mais que dans l'environnement bioclimatique de la zone soudanienne elles subissent à l'inverse des transformations brutales manifestées par :

- la destruction des structures initiales que sont les organisations plasmiques,
- la perte d'une fraction importante du plasma,
- la réorganisation du squelette qui, libéré de sa gangue, devient jointif, formant alors des assemblages granulaires.

Il en déduit que ce sont les organisations de ces sols kaoliniques qui deviennent instables lorsqu'on remonte vers le nord, à partir d'une pluviosité moyenne annuelle de 1100 à 1200 mm et que, dans certaines conditions, les transformations qui en résultent, sur granite, ont pour conséquence la progression du domaine lessivé, d'aval en amont, aux dépens du domaine initial.

Il apparaît donc que ce phénomène est très général. Notre contribution à son étude porte plus particulièrement sur les conditions exactes du déséquilibre bioclimatique qui fait intervenir, d'une part le maintien ou la suppression du drainage vertical, d'autre part l'ultradessiccation.

a) Le drainage vertical est tributaire de la saison des pluies. Les études hydrogéologiques (cf. chapitre 1 §C) révèlent en effet que les nappes phréatiques ne sont alimentées que si la pluviosité dépasse un seuil (GOUZE, 1969) qui varie selon les régions et selon la couverture végétale : de l'ordre de 800 à 900 mm sous forêt en moyenne Casamance, il s'abaisse à près de 300 mm dans les zones dénudées du Sine Saloum. Son dépassement permettrait au sol, d'une part de reconstituer ses réserves en eau et de rétablir ainsi l'état hydrique stationnaire de référence de saison des pluies (HUMBEL, 1975), d'autre part de drainer ; de telles conditions semblent être l'une et l'autre nécessaires au maintien et à l'ap-

profondissement des sols rouges ferrallitiques.

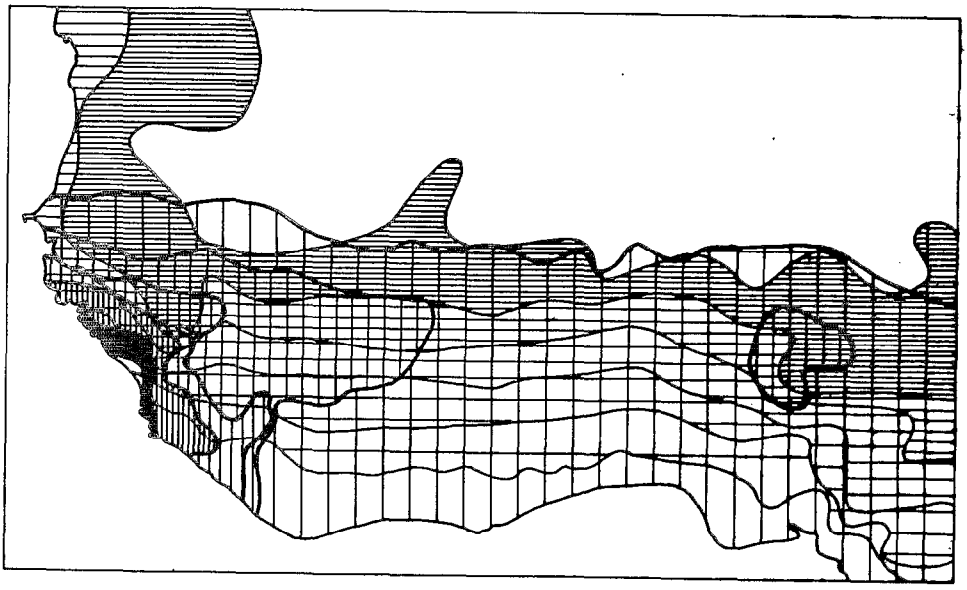
b) L' "ultradessiccation", qui se produit en saison sèche, est une conséquence des souffles d'air très sec qui suivent alors les oscillations du front intertropical.

Elle suppose un desséchement physique par remontée d'eau à la surface du sol et vaporisation dans l'atmosphère. Elle est donc dépendante, d'abord de l'humidité relative de l'air, mais aussi de l'écran protecteur fourni par la végétation arborée et de la conductivité hydraulique du matériau pédologique. Evacuant l'eau retenue dans les cryptovides des assemblages plasmiques par l'effet d'une contrainte d'origine climatique, elle provoque la rupture des liaisons entre les particules argileuses et leur réorganisation ultérieure lors de l'humectation. Elle est donc responsable de la destruction des structures plasmiques ferrallitiques.

Les processus qui nous intéressent le plus directement ici se produisent dans les zones caractérisées, à la fois par des pluviosités suffisantes pour assurer un drainage (ou un écoulement latéral) et par des intrusions d'air très sec en février, mars, avril, responsables de l'effondrement des structures plasmiques, et, par la même, d'une transformation des systèmes poreux, génératrice d'hydromorphie secondaire.

Les paramètres climatiques qui permettent de définir la zone affectée sont donc doubles. Après divers essais, nous avons retenu la pluviosité du mois d'août (durant lequel se produisent les plus fortes précipitations) et l'humidité relative minimale moyenne du mois de mars. Les courbes d'égales valeurs correspondantes, reproduites à partir de l'atlas de l'Afrique de l'Ouest (1972, O.U.A. - I.F.A.N.) sont représentées sur la figure 14-1. Elles délimitent les zones soumises alternativement à de fortes précipitations et à des dessiccations intenses (fig. 14-2). On remarque que celles-ci constituent une bande latitudinale continue qui sépare la zone tropicale humide des régions sèches sahéliennes.* La moyenne Casamance (où sont associés sols rouges et beiges) s'y trouve incluse, tandis que la basse Casamance (dominée par les sols rouges) se situe au-delà de sa limite méridionale.

* Cette bande correspond à la zone N° 2 sur la carte de la figure 14-2.



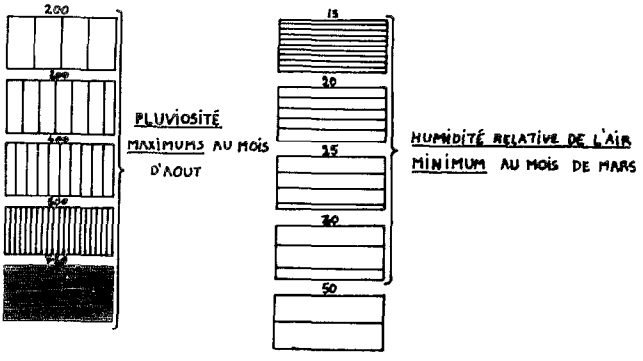


Fig. 14-1 : Distribution des 2 paramètres intervenant dans les déséquilibres bioclimatiques.

	DRAINAGE	DESSICATION	CONTRASTES
①	+ +	(+)	FAIBLES
②	+ +	+ + +	FORTS
③	+	+ + + +	FAIBLES
④	o	+ + + +	FAIBLES

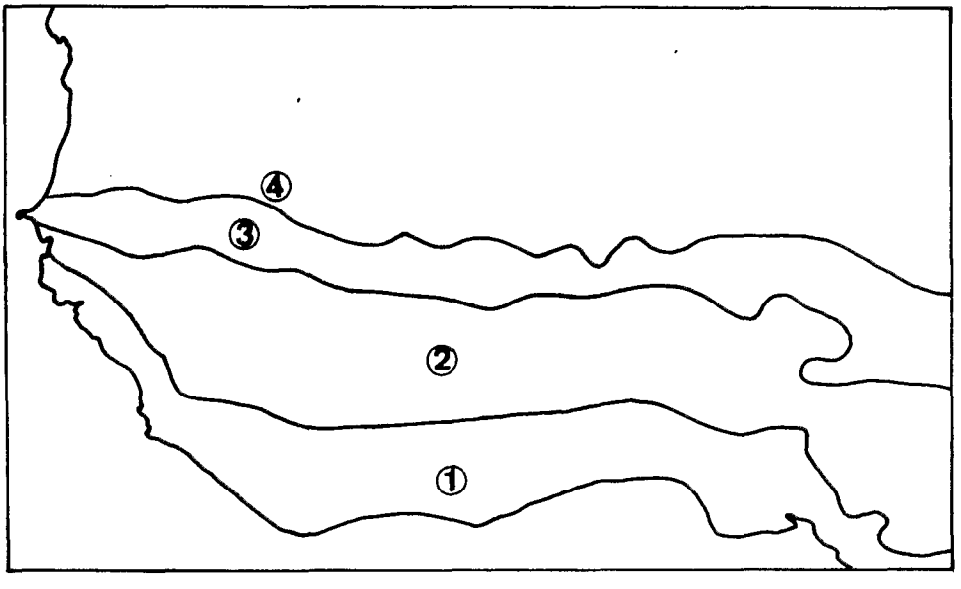


Fig. 14-2 : Esquisse cartographique des contrastes climatiques
(la bande N°2 correspond aux climats les plus contrastés)

En définitive, c'est là que la probabilité d'intervention des phénomènes de déferrallitisation est la plus forte.

2/ - La disjonction consécutive "plasma-squelette" et ses conséquences sur l'évolution des sols.

Dans tous les cas la conséquence de l'ultradessiccation est la dissociation de la structure plasmique et sa séparation du squelette. Cependant, celle-ci se manifeste par des caractères de différenciation dissemblables selon la façon dont s'effectuent les ruptures de liaison entre la kaolinite, les oxy-hydrates de fer et le squelette quartzeux. Nous avons vu à ce sujet qu'il existait deux grandes possibilités :

- une évolution vers les sols rouges sableux,
- une évolution vers les sols beiges à profils différenciés.

Le problème est maintenant de caractériser chacune de ces voies.

a) Evolution vers les sols rouges, sableux, non différenciés, appauvris.

Elle est liée à une certaine progressivité de l'intensité et de la fréquence des phénomènes d'ultradessiccation. A l'origine, l'armature du matériau ferrallitique rouge est assurée par la structure micronodulaire, au sein de laquelle est maintenue une macroporosité importante, apte à assurer le drainage vertical. Le renouvellement des phases d'ultradessiccation ménagée (selon le rythme des jours et des saisons) dissocie de faibles quantités de plasma (kaolinite + hydrates ferriques) sans porter atteinte à l'armature, et les rend apte à être entraînés par drainage vertical durant la période des pluies *. Il en résulte une exportation réduite

* L'entraînement annuel de faibles quantités "d'argile facilement exportable" au début de la période de drainage, a été mis en évidence dans les sols sablo-argileux ("dior" et "rouge") reconstitués dans les cases lysimétriques de Bambey (CHAUVEL et CHARREAU, 1972).

mais répétée de plasma* et, par voie de conséquence, une concentration relative du squelette quartzeux ; ce dernier assure alors progressivement la relève de la structure micronodulaire comme constituant de la charpente et maintient les possibilités de drainage vertical et donc d'exportation d'argile vers la base du profil ; de la sorte, le processus peut se poursuivre aisément, à moins toutefois que n'intervienne une forte libération d'argile, par l'effet d'une brusque et intense dessiccation, susceptible de provoquer le colmatage. Cette éventualité se trouve être d'ailleurs d'autant plus réduite que l'évolution a atteint un stade plus avancé, puisque la quantité d'argile susceptible d'être mobilisée décroît progressivement. Les sols devenus sableux dans toute la partie superficielle du profil peuvent alors être soumis à des conditions climatiques très arides, sans qu'il en résulte d'autre évolution qu'une reprise par le vent, des sables ainsi séparés de leur gangue plasmique.

Cette évolution affecte les profils de sol rouge de façon progressive de haut en bas : très marquée dans les horizons A, AB et B 1 (constituant l'apexsol), elle atteint globalement les horizons plus profonds (où sa propagation serait facilitée par les activités de transport de la faune). Elle aboutit à la formation de sols rouges sablo-argileux à sableux à profils peu différenciés.

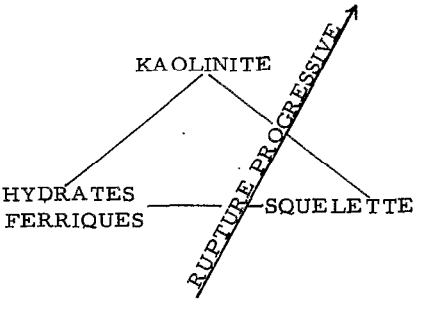


Fig. 14-3 - Disjonction "plasma-squelette" dans les sols rouges peu différenciés.

Elle correspond en fait au phénomène d'appauvrissement dans le sens le plus général et le plus complet du terme. Celui-ci résulterait ainsi de la rupture progressive de l'état d'association (fig. 14-3) entre le squelette (maintenu sur place) et le plasma argilo-ferrique, avec entraînement vertical par les eaux de drainage de ce dernier qui peut être accumulé dans les

*Des exportations semblables, assimilées à un "vidage" sans effondrement de la structure, ont été provoquées lors des essais de fonctionnement réalisés sur des colonnes de sol rouge, par l'effet de traitements dissociants ménagés (réactif oxalique dilué et dessiccation) cf. chapitre 11 § B.

horizons profonds (il formerait les ferri-argilanes observés dans l'horizon B_3 C à 7 mètres et plus) ou exporté en suspension dans l'eau jusqu'au niveau de la nappe.

b) Evolution vers les sols beiges à profils différenciés.

A la progressivité que présentait le processus d'appauvrissement s'opposent ici les limites tranchées qui correspondent au front de propagation des sols beiges. En présence de variations continues des conditions pédobioclimatiques, de telles limites tendent à faire penser à l'existence d'un seuil, au-delà duquel le système des sols rouges bascule vers un nouvel état d'équilibre, stable dans les conditions actuelles.

La phase initiale de l'évolution est semblable à celle du processus d'appauvrissement : une fraction de l'argile primitivement immobilisée sous forme d'assemblages tridimensionnels dans la structure micronodulaire est dissociée par l'effet des ultradessiccations et humectations alternées, qui rompent les liaisons interparticulaires et séparent les cristallites d'argile du squelette inclus dans les micronodules, comme cela est indiqué sur la fig. 14-4 (numéro 1).

Les différences ne se manifestent qu'à partir du moment où la capacité d'entraînement par drainage vertical devient insuffisante pour assurer l'évacuation de l'argile dissociée qui est ici en plus grande quantité. Il en résulte la formation d'une texture plus argileuse qui modifie immédiatement le fonctionnement hydrique du sol et provoque le développement d'une hydromorphie secondaire (ou induite) * . Celle-ci entraîne une action physico-chimique : dans un premier stade se produit une dissociation entre la kaolinite et les substances ferrifères (ou déferrification)

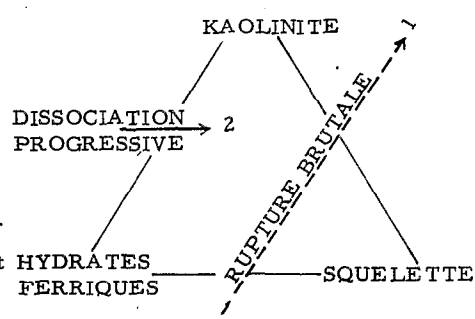


Fig. 14-4 - Disjonction "plasma-squelette" dans les sols beiges différenciés.

* Le colmatage des colonnes de sol rouge, allant de pair avec l'effondrement de la structure micronodulaire, a été obtenu expérimentalement par l'intervention de traitements dissociants énergiques (cf. chapitre 11 § B).

indiquée sur la figure 14-4 (numéro 2). Une partie de ces dernières s'incruste alors dans les fissures du quartz (squelette) ou imprègne le plasma des nodules (constituant en quelque sorte un pseudosquelette), tandis qu'une fraction importante est évacuée, en même temps que l'argile, en suspension dans les eaux de drainage vertical ou d'écoulement latéral subsuperficiel.

Cette évolution aboutit à la formation d'un profil différencié de sol beige où se reconnaissent des horizons : A et AB sableux, B 1 argilo-sableux colmaté ; B 21 "concrétionné"; B 22 et B 3 à taches de pseudogley (issues de la ségrégation des hydrates ferriques et de la kaolinite).

Cette évolution, qui donne naissance à des sols de type "ferrugineux tropical lessivé à concrétions et à taches de pseudogley", tels qu'ils ont été reconnus au départ par AUBERT en 1945-1946 puis définis par MAIGNIEN (1964), AUBERT (1965) et FAUCK (1968), est la résultante d'un déséquilibre entre la vitesse de dissociation de l'argile et la capacité d'évacuation du matériau, responsable de l'intervention d'une hydromorphie secondaire et de la transformation irréversible du sol. Elle peut donc être due à une limitation des possibilités de drainage dépendante des conditions initiales (position topographique, efficacité du réseau hydrographique), mais elle est surtout liée à la dynamique de l'évolution pédogénétique (effet de colmatage).

La conséquence de cette évolution est une limitation du flux vertical qui caractérisait les sols rouges et l'amorce d'un flux latéral subsuperficiel (écoulement hypodermique sporadique) ou superficiel (dans le cas des sols cultivés sur lesquels se développe un ruissellement intense). Elle exerce son effet sur les possibilités de redistribution et d'exportation d'argile qui interviennent alors, non plus seulement verticalement, mais de façon latérale, en relation avec la différenciation des horizons pédologiques. Ainsi se substitue au phénomène d'appauvrissement généralisé, une sorte d'érosion sélective superficielle et hypodermique.

x

x x

Tableau 14-1

LES DEUX VOIES D'EVOLUTION DES SOLS ROUGES FERRALLITIQUES EN CLIMAT CONTRASTE.

ULTRADESSICCATION (contraintes pédohydriques)	DISJONCTION	FLUX	EVOLUTION
MENAGEE →	D. PROGRESSIVE	VERTICAL (non limité)	vers les sols ROUGES SABLEUX (APPAUVRISSEMENT)
V. de libération de l'argile < capacité d'évacuation	PLASMA (Hydr. de fer + Kaol.) | SQUELETTE QUARTZEUX		
	entraîné vertica- lement ↓ | accumulé		
BRUSQUE →	D. BRUTALE	VERTICAL limité ; amorce d'un flux LATERAL	vers les sols BEIGES à profils différenciés "ferrugineux tropicaux lessivés"
V. de libération de l'argile > capacité d'évacuation	PLASMA (Hydr. fer + Kaol.) | SQUELETTE QUARTZEUX		
↓			
HYDROMORPHIE →	DISSOCIATION Hydr. de fer | Kaol.		

Les processus correspondants aux deux voies d'évolution sont résumés dans le tableau 14-1.

Ces deux voies sont donc différentes l'une de l'autre, en particulier en ce qui concerne l'intervention des phénomènes d'hydromorphie secondaire limitée aux sols beiges, responsable de la dissociation du fer et de la kaolinite.

Au demeurant, la disjonction "plasma-squelette" (ainsi que l'appauvrissement et/ou la redistribution d'argile qui en découlent) apparaît comme le phénomène pédologique majeur de la zone tropicale à saisons contrastées. Elle est même à la base de la préparation du matériel sableux qui participera aux phénomènes de transport éoliens dans les zones sahéliennes et subdésertiques plus septentrionales.

B - CONSIDERATIONS SUR LA DISTRIBUTION ET LE DEVELOPPEMENT GENERALISE DES SOLS SABLEUX NON DIFFERENCIES DANS L'OUEST AFRICAIN.

1/ - Etude des relations : sols-pédoclimat : les principaux domaines pédobioclimatiques de la zone tropicale à saisons contrastées.

a) Présentation des données de cartographie pédologique. Il s'agit surtout des résultats des synthèses cartographiques, plus particulièrement de celle relative à l'Afrique de l'Ouest, réalisée récemment d'après les travaux de l'O. R. S. T. O. M. à l'échelle du 1/5. 000. 000 (O. U. A., I. F. A. N. 1972)*. Elle nous révèle les grandes lignes de la distribution des sols sur une vaste partie du continent africain.

A partir de l'examen de ce document, il est possible, de façon très schématique, de reconnaître plusieurs grandes zones dont la distribution est sensiblement latitudinale (fig. 14-5). Du sud au nord, celles-ci correspondent :

(A) - à la prédominance des sols ferrallitiques,

(B) - à la coexistence de sols ferrallitiques et de sols ferrugineux tropicaux lessivés sur manteaux d'altération kaolinique ancien,

(C) - à la généralisation des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux et sables éoliens,

(D) - au développement des sols brun rouge subarides sur sables éoliens.

Ainsi succèdent aux sols ferrallitiques micronodulaires (ou "pseudosableux"), les sols ferrugineux tropicaux lessivés qui leur sont associés plus au nord dans lesquels la présence d'argile est mieux révélée, puis des sols de plus en plus sableux, rendus vulnérables aux actions éoliennes responsables de l'édification des grands systèmes dunaires à différentes époques du quaternaire (GROVE, 1958; GAVAUD, 1967).

---

*Carte dressée par BOULET, FAUCK, KALOGA, LEPRUN et VIEILLEFON (O. R. S. T. O. M.) et par RIQUIER (F. A. O. ROME).

A. Prédominance des sols ferrallitiques.

B. Coexistence de sols ferrallitiques et de sols ferrugineux tropicaux sur les manteaux d'altération kaolinique anciens

C. Généralisation des sols ferrugineux tropicaux.

D. Développement des sols brun rouge subarides sur sables éoliens.

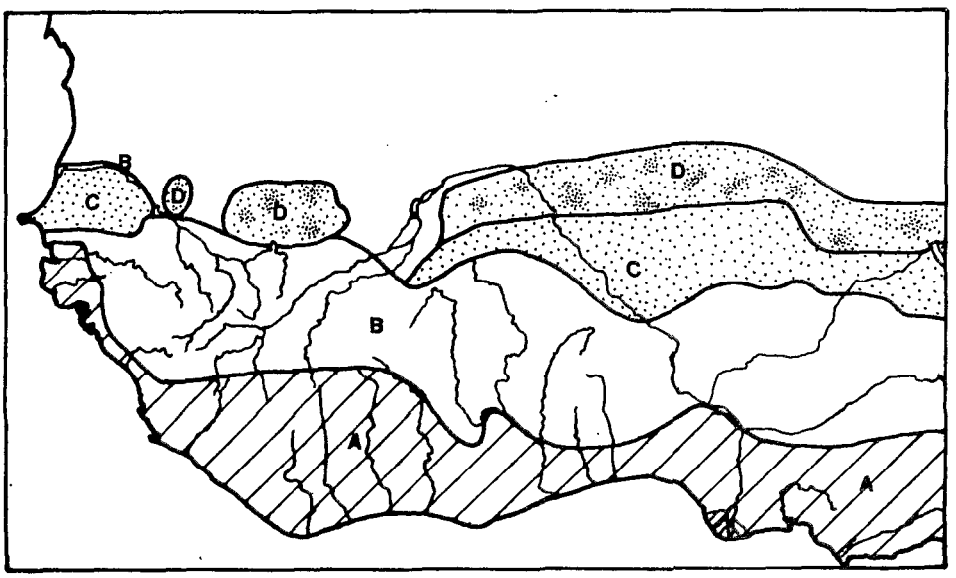


Fig. 14-5. Esquisse schématique de répartition des principaux types de sols à dominance de kaolinite en Afrique de l'Ouest.
D'après la synthèse cartographique à l'échelle du 1/5 000 000
O.U.A. - I.F.A.N. 1972.

b) Comparaison avec les éléments bioclimatiques. La superposition et la comparaison des cartes de distribution des sols et de celle des contrastes climatiques étudiée précédemment (fig. 14-2) fait apparaître aisément un certain nombre de faits :

- la zone où dominent les sols ferrallitiques est caractérisée par un drainage important et par de faibles dessications durant de brèves saisons sèches;
- sols ferrallitiques et sols ferrugineux tropicaux lessivés coexistent sur les manteaux d'altération kaolinique anciens dans la zone à climat contrasté où alternent des périodes très humides et des phases de forte dessiccation au cours de la saison sèche (lorsque souffle l'harmattan);nous avons constaté que la différenciation des sols beiges s'y effectuait à partir des matériaux issus de la deferrallitisation;
- les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux et sables éoliens s'étendent dans la zone climatique soumise à des drainages occasionnels durant les mois les plus pluvieux, mais surtout à des ultradessiccations fortes et régulières;
- les sols brun rouge subarides sur sables éoliens enfin sont caractéristiques de la zone climatique dans laquelle les possibilités de drainage sont pratiquement inexistantes, tandis que la sécheresse est largement prédominante.

c) Interprétation pédoclimatique. Elle a pu être réalisée grâce aux études pédologiques localisées relatives aux modalités du passage des sols rouges ferrallitiques aux sols appauvris à texture sableuse, en relation avec les variations du climat et de la couverture végétale. En allant du sud au nord, nous nous appuierons plus spécialement sur les recherches effectuées par :

- BOISSEZON (1965) sur les sols de savane des plateaux Bateké (Congo)
- RAUNET (1971) au sujet des "terres de Barre" du Togo et du Dahomey
- CHARREAU et FAUCK (1970) puis CHAUVEL(1976) en Casamance (Sénégal)
- BERTRAND (1971) dans le Sine Saloum (Sénégal)
- CHARREAU (*) sur les sols "Dior" de Bambey (Sénégal).

* Communication verbale de CHARREAU

Les deux premières études sont localisées dans la zone des sols ferrallitiques dominants sous climat humide (zone A sur la fig. 14-5).

- Sur les plateaux Bateké (Congo), à la limite entre les climats guinéen-forestier et Soudano-guinéen (pluviosité 1700 à 1900 mm, saison sèche de 2 à 3 mois), BOISSEZON (1965) constate que les sols les plus appauvris correspondent à d'anciennes jachères recouvertes par une végétation de savane basse peu arbustive. La perte d'argile, liée ou tout au moins accélérée par la mise en culture, y affecte la partie du profil, marquée par un niveau de compacité, qui correspond à la limite de la couche de sol régulièrement atteinte par la dessiccation[##] surmontant des horizons qui restent "frais" toute l'année.

- Dans une région moins pluvieuse (800 mm) soumise à 5 mois de saison sèche (en 2 périodes) au Togo et au Dahomey, RAUNET(1971), à la suite de l'étude pédo-agronomique systématique de différentes stations réparties sur les terres de Barre, observe que les témoins non dégradés sous forêt sont incontestablement plus riches en argile que les sols cultivés depuis le début du siècle. Il précise qu'il s'agit là d'un phénomène relativement lent, puisqu'il n'est pas systématiquement discernable sur la plupart des essais mis en place depuis quelques dizaines d'années.

La troisième est localisée en Casamance, dans la zone climatique la plus contrastée, là où sont associés les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux tropicaux (zone B).

- Nous savons que deux transformations différentes y affectent les sols rouges ferrallitiques :

. évolution vers les sols rouges sableux appauvris, lorsque le sol est en pente et/ou soumis à des ultradessiccations ménagées, le phénomène est alors comparable à celui décrit au Togo, au Dahomey et au Congo.

. évolution vers les sols beiges " colmatés"(ferrugineux tropicaux lessivés) sur les plateaux, là où le sol est soumis à des dessiccations brusques et intenses par l'effet de l'harmattan.

[##] Selon les indications données par ESCHENBRENNER, il semble que les mêmes faits ne soient pas observés à Abidjan où la dessiccation des sols serait exceptionnelle.

La distribution des sols qui en résulte, assez comparable semble-t-il à celle observée au Tchad (PIAS, 1970), serait caractéristique de la zone climatique la plus contrastée.

- Au nord de cette même zone climatique, les précipitations sont moins intenses et les conditions de dessiccation plus régulièrement fortes. PIERI (1969) et BERTRAND(1971) y observent des sols rouges ferrallitiques beaucoup plus sableux dans l'ensemble que ceux de Casamance, particulièrement au niveau des horizons A, AB et B_1. Situés sur des buttes, ils sont localement recouverts par des rides et des voiles éoliens, auxquels succèdent de petites dunes quelques dizaines de kilomètres plus au nord.

. Il est logique de penser que les sables quartzeux, libérés de leur gangue plasmique et accumulés dans les horizons superficiels, où les protège seulement une végétation clairsemée, constituent le réservoir de sable à partir duquel s'alimentent les transports éoliens.

. C'est dans une zone climatique plus aride, à drainage occasionnel, où dominent les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux (zone C), que se situe la station de Bambey.

- Les sols "Dior" y ont fait l'objet de nombreuses études. Dans une communication verbale, CHARREAU nous a signalé la présence, à côté des grains de sable, de petits glébules, de couleur rose, dont le diamètre est de l'ordre de quelques dizaines de microns. L'analyse par la méthode thermogravimétrique révèle qu'ils sont essentiellement constitués de kaolinite et qu'une fraction importante de l'argile totale contenue dans le sol, se trouve, dans certains horizons, immobilisée sous cette forme. L'observation microscopique des lames minces fabriquées à partir de ces grains montre qu'ils correspondent en fait, à de petits nodules argileux isotropes, localement associés à des vestiges d'argilanes. Il s'agit donc de pédoreliques. Les analogies qu'elles présentaient avec les micronodules des sols de Casamance, suggèrent l'hypothèse selon laquelle ce matériau sableux pourrait constituer l'ultime reliquat d'un appauvrissement extrême des sols rouges ferrallitiques, plus ou moins remaniés par des actions éoliennes. Mais naturellement une telle conception mérite d'être vérifiée plus en détail dans l'avenir.

2/ - Généralisation de la notion d'appauvrissement en argile et genèse des sols sableux non différenciés.

La structure micronodulaire continue, caractéristique des sols rouges ferrallitiques, reste très filtrante lorsqu'elle est soumise à des dissociations progressives et ne libère alors que de petites quantités d'argile (constituant des suspensions très stables *) après chaque phase d'ultradessiccation. Il s'en suit un appauvrissement en argile qui, bien que très lent, peut aboutir en quelques millénaires à la formation de matériaux sableux. A l'appui de cette manière de voir, nous citerons quelques observations :

1°/ CHAUVEL et CHARREAU (1972) étudiant les exportations d'argile à partir de sols sablo-argileux reconstitués dans les cases lysimétriques de Bambey, constatent qu'elles se produisent au début de chaque période de drainage et ne portent que sur des quantités d'argile "facilement exportable" préparées au cours de la précédente saison sèche. Celles-ci sont en moyenne de 2 à 7 grammes d'argile/m^2/an durant la période 1954-1966.

2°/ VIEILLEFON (1974) évalue très approximativement les quantités d'argile entraînées par l'écoulement du fleuve Casamance, à partir des teneurs en suspension dans les eaux courantes et du débit. Il constate que ces quantités correspondraient, pour l'ensemble du bassin versant en amont de Ziguinchor, à une ablation moyenne d'environ 0,4 mm par an, portant essentiellement sur la fraction argileuse du sol.

3°/ Cet auteur estime encore que la couverture pédologique du bassin versant, et en particulier les sols rouges et beiges de plateau, est à l'origine des sédiments argileux déposés dans l'estuaire du fleuve, sur lesquels se sont formés les sols de mangrove, objets de son étude.

Ainsi les processus qui donnent naissance aux sols sableux, en allant du sud au nord de la zone à climat contrasté, seraient donc aussi à l'origine des dépôts argileux formés à partir de matériaux exportés, soit dans les estuaires des fleuves (Casamance, Gambie, Sénégal), soit encore dans les basses vallées et dans les deltas internes (Niger). Ils représentent d'immenses volumes d'argile, en relation avec le développement généralisé des sols sableux dans toute la zone sahélienne.

* Les suspensions recueillies dans les cases lysimétriques de Bambey se sont révélées difficiles à floculer.

D'autres travaux, réalisés récemment, aboutissent à des hypothèses convergentes. Citons en particulier ceux de BREWER et BETTENAY (1972) relatifs à l'origine des plaines sableuses de l'Ouest Australien.

Ces auteurs observent dans ces sols, épais de 1,10 mètres, la présence de glébules (micronodules et concrétions), constitués principalement d'argile et d'oxy-hydrates de fer, se présentant comme des entités distinctes et indépendantes, qui interviennent comme constituants de la charpente au même titre que les grains du squelette : il s'agit de "pédoréliques" dont l'organisation est analogue à celle des matériaux "latéritiques" sous jacents.

La formation de ces "sables" ne peut être expliquée que par l'intervention d'une disjonction physique généralisée entre le squelette et le plasma, suivie d'une séparation de l'argile contenue dans ce dernier. A ce sujet, PRIDER (1966) pense que la plus grande partie de ce matériau a été formée "in situ" par évolution de la partie supérieure de profils "latéritiques".

L'absence de différenciation texturale et de tout indice d'éluviation, ainsi que l'inexistence de dépôts argileux illuviaux dans le matériau latéritique sous jacent, incitent toutefois BREWER et BETTENAY à supposer que la séparation de l'argile s'est effectuée à l'occasion d'un colluvionnement du matériau précédemment altéré.

Le phénomène d' "appauvrissement", qui correspond à un lessivage progressif, vertical et lointain, tel qu'il se présente dans les sols du Sénégal, semblerait être de nature à expliquer beaucoup mieux la formation "in situ" de ces "horizons" sableux de profondeur constante voisine de 1 mètre, qui seraient ainsi caractéristiques de la zone à climat contrasté.

Ces couvertures sableuses sont, par la suite, remodelées et partiellement redistribuées par des actions éoliennes, constituant alors les grands ergs situés au sud du Sahara. Selon GROVE (1958), une partie de cette couverture, peu épaisse, proviendrait de l'évolution des roches sous jacentes. Elle résulterait ainsi d'un processus comparable à l'appauvrissement.

En conclusion, deux conséquences fondamentales semblent pouvoir être dégagées de l'ensemble de ces données :

1/- La disjonction du plasma et du squelette sous l'effet d'ultradessiccation (et d'humectations alternées) suivies par une exportation progressive et lointaine de l'argile, semble bien être, dans la zone tropicale à climat contrasté, un phénomène général intervenant sur les manteaux d'al-

tération kaolinique issus d'une pédogénèse ferrallitique ancienne.

2/ - Cette disjonction constitue, en quelque sorte, un phénomène zonal(1) ce qui signifie que le caractère sableux, qui se généralise dans cette zone située entre le domaine ferrallitique et le Sahara, n'est pas fortuit mais trouve son origine dans la mise en oeuvre d'un processus pédogénétique original.

La zonalité paléogéographique et pédologique de la couverture sableuse, mise en évidence au Niger par GAVAUD dès 1968, résulterait pour une grande part de l'intervention de ce phénomène.

(1) Se référer par exemple aux remarques de PORTERES (1952) sur la texture des sols du Sénégal.

C - GENESE DES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX LESSIVES DE PLATEAU - ORIGINALITE DE LA "TRANSFORMATION TOPOSEQUENTIELLE" PAR RAPPORT AUX AUTRES TOPOSEQUENCES DE LA ZONE TROPICALE A CLIMAT CONTRASTE.

La zone à climat contrasté, où sont observées les transformations des sols rouges en sols beiges, est aussi caractérisée par un certain nombre de toposéquences pédologiques, notamment par celles qui ont été récemment étudiées par BOCQUIER (1971), KALOGA (1972), BOULET (1974), LEVEQUE (1975), GAVAUD (1975).

BOULET (1974) a d'ailleurs clairement mis en évidence l'importance relative ou la généralité de ces toposéquences dites "monotones" et "contrastées à redistribution latérale" dans l'ensemble des surfaces non recouvertes par un manteau d'altération kaolinique ancien. Son analyse n'aborde donc pas la question des sols rouges et beiges formés sur les matériaux du "Continental terminal" qui constituent des chaînes de sols d'un autre type dont il convient d'abord de préciser la spécificité avant de les comparer aux autres.

Nous les appellerons toposéquences "différenciées".

1/ - Caractérisation de l'évolution latérale. Mise en évidence des toposéquences "différenciées".

Cette évolution se situe dans un cadre dont les dimensions sont celles de l'espace et du temps.

a) Evolution dans l'espace. Il est clair, comme on l'a montré, que ces transformations n'interviennent et ne se propagent que là où la pente est suffisamment faible ($< 1,5\%$) et que le premier effet d'une atteinte de l'ultradessiccation sur le tassement (cf. chap. 13) se manifeste par la formation de microcuvettes. Or celles-ci, qui sont aptes à retenir l'eau libre dès qu'intervient une limitation du drainage vertical, créent ainsi des engorgements temporaires qui accentuent les contrastes du pédoclimat (alternance de dessiccation d'humectations excessives) et provoquent l'intervention d'une hydromorphie secondaire, responsable de la déferrisation et de la dissociation totale de l'argile.

Ces conditions se sont trouvées réalisées dans les parcelles mises en culture à Séfa, dont les pentes sont inférieures à 1,5% ⁺. Les sols rouges typiques y ont acquis rapidement les caractères morphologiques des sols de transition observés sous forêt. De petites dépressions s'y transforment en mares temporaires durant les périodes très pluvieuses.

Sous forêt, la propagation des sols beiges, représentée de façon schématique, sur la fig. 14-6, correspondrait au déplacement d'un gradient latéral d'humidité à l'occasion de périodes sèches.

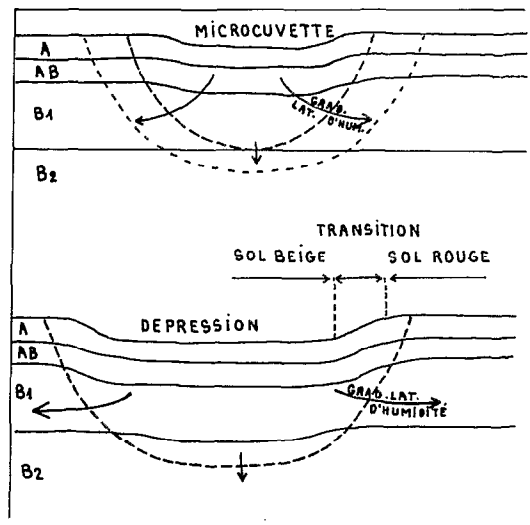


Fig. 14-6 : Déplacement latéral du gradient hydrique dans les toposéquences différenciées.

Il semble que l'évolution s'amorce à partir des microcuvettes situées dans la partie centrale des plateaux. Là où la pente est pratiquement nulle (et les possibilités d'écoulement latéral réduites), celles-ci sont en effet capables de s'autodévelopper⁺⁺, par le seul effet de leur dynamique propre, même en l'absence de tout changement notable des conditions externes : les contrastes pédoclimatiques qui s'y trouvent accentués gagnent en effet progressivement les sols rouges avoisinants, en même temps qu'ils en modifient la microstructure, et par là même, le comportement hydrique.

⁺ Les pentes les plus fortes sur lesquelles se manifestent en effet un ruissellement et une érosion intense n'on pas pu en effet être maintenues en culture et ont été reboisées (CHARREAU-FAUCK, 1970).

⁺⁺ Ces propriétés d'autodéveloppement ont déjà été mises en évidence dans les toposéquences où s'effectuent des mouvements de matière (cf. par exemple BOCQUIER, MILLOT, RUELLAN, 1974); elles concernent ici une évolution qui résulte du seul déplacement d'un gradient hydrique, suivi par un front de dissociation de la microstructure.

Cette transformation s'effectue en place par une digestion du matériau qui a pour effet de dissocier le plasma du squelette et de permettre ainsi une réorganisation des matériaux pédologiques; celle-ci s'accompagnant à la fois d'une perte d'argile et de fer et d'un tassement appréciable (cf. chap. 13).

Il en résulte que les microcuvettes s'élargissent et se rejoignent les unes les autres formant des zones légèrement déprimées occupées par les sols "beige de plateau". Les pentes qui les délimitent se situent au niveau du sol de transition et se déplacent avec lui lorsque progresse la toposéquence. Les sols de transition correspondent ainsi à la zone pédologiquement active de la toposéquence.

b) Evolution dans le temps. L'évolution est caractérisée ici par la vitesse de la transformation. Or celle-ci dépend :

- de la quantité d'énergie nécessaire pour venir à bout de la défense du sol rouge, c'est-à-dire pour dissocier la microstructure (qui assure l'auto-régulation de son fonctionnement hydrique): l'utilisation des tests de stabilité physique et mécanique des assemblages (cf. chap. 10) nous a montré que cette quantité, sans être très élevée, était cependant appréciable.
- du moteur de l'évolution, qui résulte des conditions climatiques réalisées en saison sèche, d'autant plus actives sur le sol que celui-ci est moins protégé par le couvert végétal forestier; ce dernier intervient à la fois comme un écran s'opposant à l'échauffement du sol (Cf. chap. 2 et AUBERT, 1959) et comme un régulateur de l'humidité atmosphérique diminuant la contrainte pédohydrique (cf. chap. 13). L'évolution est aussi caractérisée par sa direction qui est centrifuge (fig. 14-6).

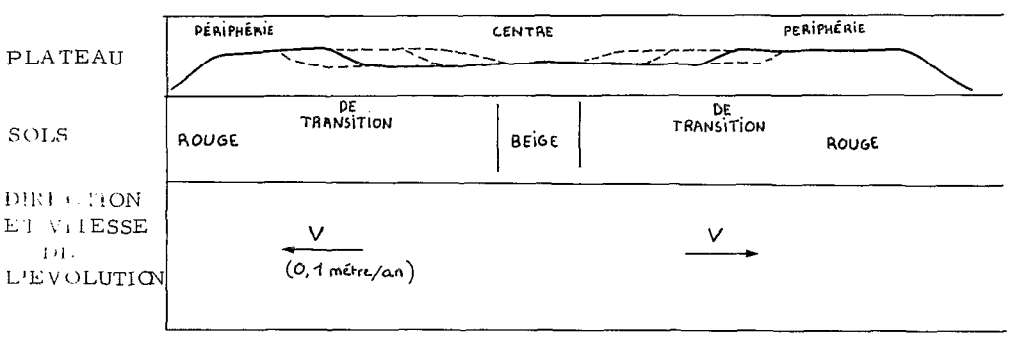


Fig. 14-7 - Direction et vitesse de propagation de l'évolution latérale.

c) Synthèse espace-temps. Afin d'apprécier les conditions de cette propagation, il est utile d'établir un rapprochement entre les évolutions observées dans l'espace, selon l'axe de la toposéquence et celles qui ressortent de la comparaison de sols rouges plus ou moins anciennement mis en culture. Cette approche est présentée de façon schématique dans la figure 14-7.

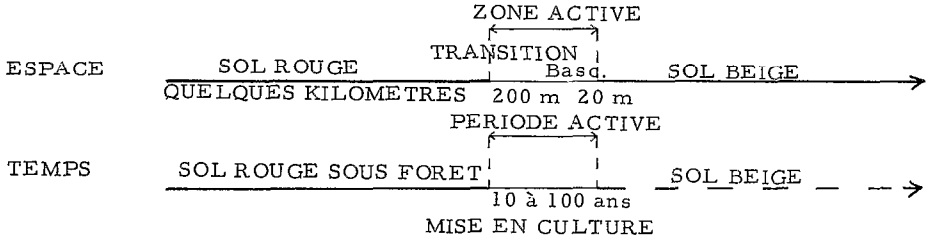


Fig. 14-8 : Comparaison des évolutions du sol rouge dans l'espace et dans le temps.

. Sur les toposéquences il existe une disproportion entre l'extension des sols rouges et des sols beiges d'une part, (ordre de grandeur supérieur au kilomètre) et l'étroitesse de la frange occupée par les sols de transition d'autre part, dont seule une bande très étroite présente les caractères morphologiques qui indiquent le basculement de l'organisation des sols rouges vers celle des sols beiges; il s'agit de la zone active dont la largeur est de l'ordre de 20 à 200 mètres.

. L'évolution dans le temps est marquée par le maintien de l'état métastable tant qu'est conservée la forêt après défrichement. L'évolution est alors rapide durant les quelques dizaines d'années qui suivent, manifestant une modification de l'organisation vers celle des sols beiges dont les caractères morphologiques n'apparaissent cependant qu'à l'état d'ébauche (différenciation des horizons, nodulation, hydromorphie secondaire); il s'agit alors de la période active qui est de l'ordre de quelques dizaines d'années.

d) Essai d'évaluation des vitesses de propagation. On déduit de ces données que si la première phase de l'évolution, qui correspond en fait à la destruction de la structure micronodulaire maintenue sans forêt dans un équilibre métastable, est un phénomène rapide, pour peu que la contrainte d'origine bioclimatique soit suffisamment forte; A l'inverse la réorganisation des constituants, qui aboutit à la formation du profil différencié de sol beige, nécessite un temps plus

important qui dépasse ici largement l'échelle de durée dans laquelle se situent mes investigations sur l'effet de la mise en culture.

Sous forêt, dans des conditions bioclimatiques beaucoup moins agressives, il semble que le front d'ultradessiccation (cf. fig. 13-5) se déplace à la faveur de conditions extrêmes d'aridité et que sa vitesse soit alors dépendante des énergies mises en jeu. Compte tenu de la résistance du sol et de la protection assurée par la forêt, il apparaît que cette vitesse n'est pas très rapide. Si, de façon un peu arbitraire, nous reportons au début de la période sèche correspondant à - 20.000 ans BP la formation des sols beiges, nous constatons qu'une propagation de 2 kilomètres (déduite des reconstitutions cartographiques) correspondrait à un déplacement moyen de l'ordre du décimètre par an. La réorganisation du profil en sol beige, observée sur quelques centaines de mètres, nécessiterait alors une durée de l'ordre du millénaire. Il s'agirait donc d'un processus relativement rapide comparé au temps qui a été sans doute nécessaire à la formation des sols rouges. Il n'implique, en fait, qu'une réorganisation des constituants minéralogiques déjà formés au cours de la pédogénèse ferrallitique.

2/ - Comparaison avec les autres toposéquences à dynamique latérale de la zone tropicale sèche et en particulier avec les toposéquences contrastées.

BOULET (1974) distingue en Haute Volta, sur les surfaces non recouvertes par un manteau d'altération kaolinique, deux types de toposéquences :

- Les premières, dites "monotones" sont caractérisées par une évolution des sols essentiellement verticale et lithodépendante. Elles sont donc fondamentalement distinctes des toposéquences observées sur les plateaux de moyenne Casamance;
- Les secondes, appelées "contrastées" se décomposent en une séquence initiale dont la dynamique dominante est verticale (comme celle des sols "rouges") et une séquence secondaire "à redistribution latérale" qui progresse, de bas en haut, aux dépens de la précédente.

Comme les toposéquences "différenciées" étudiées dans ce travail, les toposéquences "contrastées" correspondent à une évolution latérale des sols. C'est donc avec elles qu'il convenait, en guise de conclusion, d'éta-

blir une comparaison. Les principaux éléments en sont regroupés dans le tableau 14-2.

Tableau 14-2 COMPARAISON DES TOPOSEQUENCES "CONTRASTEES" ET "DIFFERENCIEES".

Toposéquences en déséquilibre pédoclimatique		
effet du déséquilibre	Dissociation "Plasma-squelette"	
types de toposéquences	"contrastées" (R. BOULET)	"différenciées"
surfaces	circonscrites, limitées à des zones bien drainées, en pente, au pied des inselbergs	très généralisées, sur les manteaux d'altération kaolinique ancienne, surfaces planes des plateaux.
mécanisme	redistribution latérale	transformation latérale par digestion
exportation	massive des constituants du plasma par soutirage profond, en relation avec l'écoulement latéral de la nappe	partielle des constituants du plasma par drainage vertical, puis par "soutirage sub-superficiel" en relation avec les écoulements latéraux sporadiques
transitions	tranchées	progressives

Ainsi, les systèmes correspondant aux toposéquences "contrastées" et "différenciées" sont, l'un et l'autre, transformants, mais tandis que le premier aboutit, par convergence, à reconstituer une couverture d'altération montmorillonitique stable dans ces conditions bioclimatiques, le second développé à partir d'épais manteaux d'altération kaolinique, tend à donner la prédominance aux engorgements, puis au ruissellement lorsque s'établit une jonction avec le réseau hydrographique. Il se développe alors une érosion régressive à partir des vallées, responsable de l'extension croissante des sols "beiges de pente" remaniés aux dépens des sols beiges de plateau.

En définitive l'évolution aboutit dans ce cas à une transformation importante du paysage et à une sorte d'ablation de la partie superficielle de la couverture kaolinique.

Les minéraux ainsi entraînés, après une phase de dispersion, puis une autre de concentration dans les zones basses (constituant les dépôts sur lesquels s'installent les mangroves ou les sédiments accumulés dans les bassins endoreiques continentaux) seraient susceptibles d'évoluer alors en fonction des conditions propres à ces nouveaux milieux.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Conclusions générales

Cette étude s'inscrit dans le même cadre des "régions à climat contrasté" que celles réalisées au cours des dernières années par BOCQUIER (1971) et par BOULET (1974) qui ont mis en évidence des redistributions caractéristiques des espèces minérales en relation avec l'histoire et avec les conditions de la pédogénèse.

Sa particularité tient cependant au fait que les sols étudiés sont ici formés sur les épaisses franges d'altération superficielles (en l'occurence: les grès argileux du Continental terminal), très étendues dans cette région du globe, qui ne contiennent que des minéraux relativement résistants : oxyde de fer, kaolinite et quartz.

Dans la zone humide, ces formations portent surtout des sols rouges ferrallitiques au sujet desquels FAUCK (1970) a démontré que la pédogénèse actuelle dissout les quartz et accumule la kaolinite de manière relative.

Lorsque les conditions deviennent plus sèches, comme en moyenne Casamance par exemple (ce qui semblerait exclure toute autre différenciation pédogéochimique), les sols rouges ne sont plus seuls, mais associés à des sols beiges : il apparaît ainsi une distribution ordonnée des sols dans le paysage qui est marquée par l'existence de variations latérales et verticales importantes de la couleur et de la "manière d'être" des matériaux dont la constitution minéralogique reste cependant inchangée. Les seuls processus de différenciation possibles, qui permettent de comprendre la pédogénèse, ne sont plus alors de nature minéralogique, ni géochimique, mais sont liés essentiellement à des phénomènes d'organisation et de réorganisation des constituants du sol, ces termes étant pris dans le sens le plus large possible et faisant intervenir divers aspects physico-chimique, mécanique, biologique.

La méthode de base utilisée dans ce cas est d'abord morphologique, à toutes les échelles d'investigation : elle correspond à l'approche "toposéquentielle" définie et éprouvée par BOCQUIER (1971).

Comparée à celle des sols formés hors des manteaux d'altération kaolinique, l'évolution verticale et latérale est ici également importante,

mais elle se manifeste surtout par des changements dans l'organisation et dans le fonctionnement hydrique des sols. Les méthodes couramment utilisées en pédologie sont alors trop peu discriminantes pour nous permettre de comprendre l'évolution.

Il a donc été utile de compléter ces données par d'autres démarches qui se situent à 3 niveaux :

1/ On s'est efforcé de mettre l'accent sur l'aspect "physique du sol". A cet effet, on a été amené :

. d'une part à utiliser les caractéristiques porosimétriques et celles relatives au mode d'assemblage, en relation avec les résultats de l'observation microscopique, à des fins pédologiques;

. d'autre part, à apprécier par des mesures faites sur le terrain les variations qui portent sur le fonctionnement hydrique du sol en place

Récemment HUMBEL (1976) a appliqué la même méthode d'approche aux sols ferrallitiques du Cameroun.

2/ D'un autre côté, afin de chercher à comprendre le sens et à apprécier la vitesse de l'évolution on s'est appuyé, autant que faire se peut, sur les observations effectuées en conditions contrôlées à partir d'essais culturaux "datés" (PEDRO, 1966) ou de données historiques.

3/ Enfin, pour établir quelques connaissances de base déduites des précédentes investigations, on a procédé à un certain nombre d'essais de pédologie expérimentale réalisés au laboratoire.

Au terme de ce travail, il est possible de récapituler brièvement les principaux résultats acquis en les regroupant en 4 rubriques.

PROBLEME DE LA "DEFERRALLITISATION"

De façon paradoxale, les sols rouges ferrallitiques, dépourvus de minéraux altérables, sont cependant instables en zone tropicale à saisons contrastées : ce ne sont pas en effet leurs constituants qui sont alors transformés, mais bien leur organisation qui est profondément modifiée, en re-

lation avec leurs modalités de fonctionnement hydrique : c'est le processus de "déferrallitisation".

L'interprétation des cartes pédologiques et les résultats des essais (culturaux et réalisés au laboratoire)montrent que ce ne sont plus les paramètres climatiques habituels qui interviennent alors, mais ceux qui sont susceptibles de provoquer des contraintes mécaniques. La dessiccation extrême de la couche superficielle du sol, responsable d'un abaissement de l'humidité en dessous du point de flétrissement, exerce à cet effet une action de rupture des liaisons interparticulaires : nous l avons appelée"ultra-dessiccation". Ainsi, l'abaissement de l'humidité relative de l'air en certaines périodes de l'année, lié aux déplacements du front intertropical, devient un élément climatique fondamental de la réorganisation des structures, et donc de l'évolution du profil pédologique.

LA DISJONCTION "PLASMA-SQUELETTE" EN TANT QUE PHENOMENE GENERALISE.

L'instabilité des structures ferrallitiques résulte en fait d'une modification de la relation qui existe entre le plasma et le squelette. A un état, caractérisé par l'association entre ces deux fractions sous un bio-climat humide, succède dès qu'interviennent des conditions arides, une disjonstion de ces constituants, responsable d'une séparation plus ou moins rapide de l'argile et des sables.

Deux voies d'évolution sont alors possibles, qui dépendent de la dynamique du phénomène :

- lorsque la vitesse de séparation devient supérieure à la capacité d'évacuation du matériau, il se produit un "colmatage" et une hydromorphie secondaire, responsable de la formation irréversible de profils différenciés de type "ferrugineux tropical lessivé";
- lorsque la séparation est plus progressive, l'appauvrissement en argile se poursuit et s'amplifie, donnant naissance à des sols peu différenciés, qui sont de plus en plus sableux (rouges,puis ferrugineux-tropicaux peu lessivés, puis subarides).

La généralisation de cette exportation lente et lointaine d'argile, résultant d'actions d'origine pédoclimatique, présente de ce fait une exten-

sion à caractère zonal.

L'évolution pédologique de la zone tropicale à saisons contrastées conduit donc à des sols sableux et prépare en quelque sorte les matériaux susceptibles d'être repris par des actions éoliennes et de participer ainsi à l'édification des grands systèmes dunaires qui bordent le Sahara.

EXISTENCE DE TOPOSEQUENCES "DIFFERENCIEES".

L'évolution des sols rouges en "sols beiges de plateau" observée en moyenne Casamance, sous forêt, correspond à la première voie. La résistance des sols originaux y résulte d'une structure particulière, dite "micronodulaire", qui assure l'autorégulation de l'état hydrique. Sa transformation nécessite une énergie appréciable; aussi ne s'amorce-t-elle que dans les conditions les plus favorables (absence de pente) c'est-à-dire en certains points du centre des plateaux, provoquant alors, par un effet de tassement la formation de microcuvettes où se réalisent des conditions extrêmes d'humidité et de dessiccation. A partir de là, l' "autodéveloppement" du phénomène s'effectue par déplacement latéral centrifuge d'un certain état hydrique et se manifeste par le développement de séquences à peu près planes, ne présentant pas de nappes et ne résultant pas du déplacement de particules par l'intermédiaire d'un flux.

Ultérieurement, la différenciation pédologique se développe; elle se traduit alors par un départ d'argile et par un tassement marqué par la formation d'une légère déclivité. Celle-ci progresse de façon centrifuge, précédant l'individualisation de sols "ferrugineux tropicaux lessivés typiques". L'ensemble constitue ce que nous avons appelé une toposéquence "différenciée".

La résistance du sol rouge à la transformation de sa structure et au changement de son fonctionnement hydrique est ainsi à l'origine de zones sensibles dans l'espace (correspondant aux sols "de transition" marqués par la déclivité) et de périodes actives dans le temps (durant lesquelles s'accentuent les contrastes pédoclimatiques).

La propagation des sols ferruguneux tropicaux est relativement rapide, puisqu'il faudrait quelques dizaines d'années seulement pour obtenir le sol de transition (après déforestation) et environ 1 000 ans pour engendrer un sol beige.

Par rapport à cette première voie d'évolution, la seconde qui correspond à l'individualisation des sols à caractère sableux non différenciés, est beaucoup plus lente et nécessite une durée bien supérieure à 1 000 ans.

IMPORTANCE DE L'INTERVENTION HUMAINE

Par l'action qu'il exerce sur la couverture végétale et donc, sur l'écran qui protège le sol, l'homme provoque, ou du moins, accélère le processus de déferrallitisation d'autant plus que les conditions climatiques générales sont elles-mêmes plus contrastées.

Deux conséquences résultent de cette situation :

- la première, d'ordre méthodologique consiste en l'intérêt de promouvoir des études pédologiques dans le cadre d'essais culturaux "datés" ou de parcelles expérimentales (ROOSE, 1970), afin de mieux connaître la dynamique du processus de déferrallitisation en différents points de la zone à climat contrasté;
- la seconde concerne le rôle même de l'homme dans l'évolution de ces sols et la possibilité qu'il aurait de tirer parti des phénomènes pédogénétiques qui déterminent à la fois la disponibilité en eau pour les plantes et l'évolution des processus d'érosion hydrique.

Bibliographie

ALLISON L.E., SCARSETH S.D. - 1942 - A biological reduction method for removing free iron oxide from soils and colloïdal groups. - J. Amer. Sc. Agron., 34, p. 616.

ARCA M.N., WEED S.B. - 1966 - Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay.-Soil Sci., 66, 101, 3, pp.164-170.

AUBERT G. - 1948 - Les sols d'A.O.F. - Encyclopédie coloniale.

AUBERT G. - 1954 - Les sols latéritiques. - Ve Congr. int. Sci. Sol, Léopoldville, 1, pp.103-118.

AUBERT G. - 1960 - Influence de la végétation sur le sol en zone tropicale humide et semi-humide - in : "Rapport du sol et de la vegetation " - pp. 11-22, Masson éditeur, Paris.

AUBERT G. - 1965 - Classification des sols. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., III, 3, pp. 269-288.

AUBERT G., MAIGNIEN R. - 1947 - Les sols du Sénégal au nord de la Gambie britannique, Conf. Pédol. Médit. Alger, Montpellier.

AUBERT G., SEGALEN P. - 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol. IV, pp. 97-112.

AUBREVILLE A. - 1949 - Climat, forêt et désertification de l'Afrique tropicale. - Société d'édition géographique, maritime et coloniale, Paris.

AUBREVILLE A. - 1948 - La Casamance.
L'agron. trop., vol. VIII, n° 1 et 2, pp. 25-52.

AUDRY P., COMBEAU A., HUMBEL F.X., ROOSE E., VIZIER J.F. - 1973 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. - ORSTOM, Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, n° 2, 128 p.

BALDENSPERGER J., STAIMESSE J.P., TOBIAS C. - 1968 - Notice explicative et carte pédologique du Sénégal. Moyenne Casamance, Centre ORSTOM de Dakar, multigr.

BALLIF J.L. - 1965 - Critères de la qualité de la suspension en vue de l'analyse granulométrique, Science du sol, vol. 1, pp. 15-32.

BARBER R.G, ROWELL D.L. - 1972 - Charge distribution and the cation exchange capacity of an iron-rich kaolinitic soil. - J. Soil Sci., 23, 2, 1972.

BARBIER G. - 1938 - Conditions et modalités de la fixation de l'hydrate ferrique colloïdal par l'argile des sols. - Ann. Agron., 8, pp.34-43.

BEAUDOU A. G. - 1971 - Sols rouges et beiges sur quartzite en pays ferrallitique forestier (R. C. A.). - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IX, 2. pp. 147-187.

BEAUDOU A. G. - 1972 - Expression micromorphologique de la micro-agrégation et de l'illuviation dans certains horizons de sols ferrallitiques centrafricains et dans les sols hydromorphes associés. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., X, 4, pp. 357-371.

BERG W. A. - 1960 - A theory of ion exchange behaviour in iron-oxide-kaolinite systems. - Thèse, North Carolina State College.

BERTRAND R. - 1971 - Morpho-pédologie et orientations culturales des régions soudaniennes du Sine-Saloum (Sénégal). - Rap. I. R. A. T., SODEVA, République du Sénégal, 299 p. multigr.

BERTRAND R. - 1973 - Contribution à l'étude hydrologique, pédologique et agronomique des sols gris sableux hydromorphes de Casamance. (Sénégal). L'agronomie tropicale, vol. XXVIII, n° 12, pp. 1145-1192.

BETREMIEUX R. - 1951 - Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. - Ann. Agron. A 3, pp. 193-295.

BLACKMORE A. V. - 1973 - Aggregation of clay by the products of iron (III) hydrolysis. - Austr. J. Soil Res., 11, pp. 75-82.

BLANCHET R., PERIGAUD S., CHAUMONT C., NADEAU J. C. - 1960 - Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols. - Ann. Agron. VI, pp. 621-648.

BLOT A., PEDRO G. - 1967 - Etude des relations entre la composition granulométrique et la constitution minéralogique des sols et horizons d'altération. - Arn. Agron., 18, 2, pp. 203-216.

BOCQUIER G. - 1971 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. - Thèse Sci. Strasbourg et Mém. ORSTOM, 62, 1973, 350 p.

BOCQUIER G., MAIGNIEN R. - 1963 - Les sols bruns subarides tropicaux d'Afrique de l'ouest. - Colloque CCTA. class. sols régions intertrop., Lovanium.

BOCQUIER G., MILLOT G., RUELLAN A - 1974 - Différenciation pédologique et géochimique dans des paysages africains, tropicaux et méditerranéens - La pédogénèse latérale remontante. - Communication, 10e Congr. int. Sci. Sol, Moscou VI (1) pp. 226-230.

BOISSEZON P. de -1964 - Les sols de savane des plateaux Bateké. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol. III, 4, p. 291.

BOULET R. - 1972 - Modalités d'action du lessivage dans les sols tropicaux développés sur granite (Haute Volta). Etude micromorphologique. - Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol X, 4, pp. 321-341.

BOULET R. - 1974 - Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : équilibres dynamiques et bioclimats. - Thèse Sci. Strasbourg, multigr. 330 p.

BOULVERT Y. - 1968 - Quelques aspects de l'influence de la topographie et du matériau original 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, sér. Pédol., VI, 3-4,pp. 259-275.

BOURRIER J. - 1964 - La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode Vergière. - Bull. Techn. du G.R. n° 73.

BREWER R. - 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. - J. WILEY & Sons édit., N. Y., 470 p.

BREWER R. - 1964 - Classification of plasmic fabric of soil materials. - Soil micromorphology, 2nd Int. Meeting, Arnhem. (Elsevier), pp. 95-107.

BREWER R. - 1972 - The basis of interpretation of soil micromorphological data. Geoderma, 8, p. 81-94.

BREWER R., HALDANE A.D. - 1957 - Preliminary experiments in the development of clay orientation in soils. - Soil Sci., 84, 4, pp. 301-309.

BREWER R., SLEEMAN Y.R. - 1964 - Glaebules : their definition, classification and interpretation.- J. of Soil Sci., 15, 1, pp. 66-78.

BREWER R., BETTENAY E. - 1973 - Further evidence concerning the origin of the Western Australian sand plains. - J. of the geological Society of Australia, 19, 4, pp. 533-541.

BRIGAUD P. - 1965 - Le climat dans les études sénégalaises, n° 9, C.R.O.S.

CAILLERE S., HENIN S. - 1963 - Minéralogie des argiles. - Masson, Paris.

CHARREAU C., SEGUY L. - 1969 - Mesures du ruissellement et de l'érosion à Séfa en 1968. - I.R.A.T. Sénégal, multigr. 60 p.

CHARREAU C., FAUCK R. - 1970 - Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (Casamance). - Agron. trop., vol. XXV, n° 2, p. 151.

CHARREAU C., NICOU R. - 1971 - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-africaine et ses incidences agronomiques. - Agron. trop., 2, pp. 209-255 ; 5, pp. 565-631 ; 9, pp. 903-978 ; 11, pp. 1184-1247 ; bulletin agronomique n° 23.

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., VII, 9, pP. 449-493.

CHATELIN Y., MARTIN D. - 1972 - Recherche d'une terminologie topologique applicable aux sols ferrallitiques. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., X, 1, pp. 25-43.

CHAUVEL A. - 1966 et 1968 - Etude physique des sols de Séfa. - Centre ORSTOM Dakar, multigr. 56 p. et 74 p.

CHAUVEL A - 1972 - Observation micromorphologique de la partie supérieure des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Essai d'interprétation de la dynamique actuelle sous couvert forestier. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., X, 4, pp. 343-356.

CHAUVEL A., MONNIER G. - 1967 - Sur la signification générale de l'analyse granulométrique en pédologie ; examen des problèmes posés par la caractérisation de la texture de certains sols tropicaux. - C.R. Acad. Sci., t. 264, pp. 1969-1972.

CHAUVEL A., PEDRO G. - 1967 - Considérations sur l'analyse granulométrique et le problème de la détermination de la constitution minéralogique élémentaire de certains sols tropicaux ; nécessité et limites de la déferrification. - C.R. Acad. Sci. Paris, 264, pp. 2089-2092.

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. - C.R. Acad. Sci., t. 269, pp. 2080-2083.

CHAUVEL A., CHARREAU C. - 1972 - Observations sur l'exportation de l'argile par les eaux de drainage, effectuées sur 3 sols tropicaux sablo-argileux reconstitués en cases lysimétriques. - Bull. Ass. fr. Et. du Sol, 6, pp. 251-268.

CHAUVEL A., PEDRO G., TESSIER D. - 1976 - Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. Etudes expérimentales. - Science du Sol, n° 2, pp. 101-113.

CLAISSE G. - 1968 - Etude expérimentale de l'analyse aux trois acides ; comportement du quartz pur à l'attaque triacide. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, 2, pp. 129-149.

COINTEPAS J. P. - 1960 - Bilan des études chimiques et pédologiques entreprises à la station expérimentale de Séfa (Sénégal). - 107 p. multigr.

COMBEAU A - 1960 - Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sols ferrallitiques. - C.R. Acad. Agric., 109.

COMBEAU A., QUANTIN P. - 1963 - Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. - Sci. du Sol, 1, mai, pp. 5-11.

COMMISÃO DE SOLOS. CNEPA - 1960 - Levantamento de reconhecimento de solos de estado de São-Paulo - 634 p., 1 carte : 1/500 000.

CONINK F. de, HERBILLON A. - 1969 - Evolution minéralogique et chimique des fractions argileuses dans les alfisols et spodosols de la Campine (Belgique) - Pédologie, XIX, 2 p. 159-272.

DANCETTE C. - 1973 - Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. - C.N.R.A., Bambey, Sénégal, I.R.A.T., 32 p. multigr.

DAVIDTZ J C., SUMNER M.E. - 1965 - Blocked charges on clay minerals in subtropical soils. - J. Soil Sci., 16, p. 270-274.

DEB B.C. - 1950 - Estimation of free iron oxides in soils and clays and their removal. - J. Soil Sci., 1, 212-220.

DEMOLON A., BASTISSE E., - 1935 - Ann. Agron: pp. 1-15.

DESHPANDE T.L., GREENLAND D J., QUIRK J.P. - 1964 - Influence of iron and aluminium oxides on the charges of soil and clay materials. - Trans. 8th int. Congr. Soil Sci. Bucarest, 3, 1213-1225.

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., 19, 1, pp. 108-122.

D'HOORE J., FRIPIAT J. - 1948 - Structural variations of Yangambi (belgian Congo) soils. Soil Sci., vol. 66, n° 2.

D'HOORE J. - 1974 - Clay dispersion, particle size distribution and colloid stability, in highly weathered ferrallitic soils. - Pédologie XXIV, 2, pp. 178-190.

DIENG M. - 1963 - Etude géologique du continental terminal du Sénégal oriental. B.R.G.M., Dakar, 23 p.

DIENG M. - 1965 - Contribution à l'étude géologique du continental terminal au Sénégal. - B.R.G.M., Dakar.

DOMMERGUES Y. - 1963 - Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. Bois et Forêts des tropiques, 87, pp. 9-25.

DROSDOFF M., NIKIFOROFF C.C. - 1940 - Iron-manganese concretions in Dayton soils. Soil Sci., 49, pp. 333-345.

ELOUARD P., FAURE H. - 1967 - Le quaternaire de l'Inchiri, du Taffoli et des environs de Nouakchott, 6e congr. panafr. de préhist. et quatern. pp. 466-492.

FAUCK R. - 1955 - Etude pédologique de la région de Sedhiou, Agronomie tropicale, n° 6, pp. 752-793.

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 8e congrés intern. Sci. du Sol, Bucarest, V. 62. pp. 547-557.

FAUCK R. - 1968 - Contribution à l'étude de la morphologie et de la classification des sols ferrugineux tropicaux. - ORSTOM, 36 p. multigr.

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. - 1972 - Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique occidentale (Contribution à l'étude des sols des régions tropicales). - Mém. ORSTOM, 61, 257 p.

FAUCK R., TURENNE J.F., VIZIER - 1963 - Etude pédologique de la haute Casamance. Rap. ORSTOM, Dakar, multigr., 181 p., Ministère de l'Economie rurale et de la coopération, République du Sénégal.

FAUCK R., SEGUY L., TOBIAS C. - 1968 - Carte pédologique de la région de Séfa, Casamance, centre ORSTOM de Dakar, station IRAT de Séfa, SODAICA.

FAUCK R., MOUREAUX C., THOMANN C. - 1969 - Bilan d'évolution des sols de Séfa, Casamance (Sénégal), après quinze années de culture continue. - Agronomie tropicale, XXIV, 3, pp. 263-301.

FAURE A. - 1976 - Influence de la pâte argileuse sur la susceptibilité au tassement du sol. - Science du Sol, n° 2, pp. 121-130.

FAURE H., HEBRARD L. - 1973 - Shoreline fluctuations in Sénégal and Mauritanie during holocene time, IX intern. INQUA congr. 14 p.

FAURE P. - 1975 - Les associations de sols rouges et jaunes au nord-ouest DAHOMEY. - Caractères des sols et des séquences. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XIII, 2, pp. 119-157.

FEODOROFF A. et al. - 1972 - Hydrologie du sol, multigr., 159 p., cours ENGREF.

FIES J.C. - 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. - Ann. Agron., 22, 6, pp. 655-685.

FLACH K.W., CADY J.C., NETTLETON W.D. - 1968 - Pedogenetic alteration of highly weathered parent materials - 9 th. intern. congr. Soil. Sci., Adélaïde, IV, pp. 343-351.

RAUNET P. - 1971 - Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de Barre au Dahomey et au Togo sur les points d'essai de l'IRAT - IRAT, 119 p multigr.

ROBICHET O. - 1957 - Méthode de dosage du fer. - Thèse - Ann. Agron. p. 257.

ROGNON P. - 1975 - Paléoclimatologie et sécheresse actuelle (1969-1974) au Sahel. - Revue "Géologues", 32 (mars) pp. 55-69.

ROOSE E. J. - 1967 - Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. - L'agron. trop. vol XXII, n° 2, pp. 123-152.

ROOSE E. J. - 1970 - Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogénèse actuelle d'un sol ferrallitique en moyenne Côte d'Ivoire. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol VIII, n° 4, pp. 469-482.

RUELLAN A., DELETANG J. - 1967 - Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. - ORSTOM. Unit. Doc. techn., 5, 123 p.

SCHOFIELD R. K., SAMSON H. R. - 1954 - Flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged crystal faces. - Disc. Faraday Soc., 18, pp. 135-145.

SCHWERTMANN U. - 1964 - The differenciation of iron oxide in soils by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. (Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit ammonium-oxalate lösung.) Z. Pflanz. Düngung, 105, pp. 194-202.

SCHWERTMANN U. - 1973 - Use of oxalate for Fe extraction from soils. - Canad. J. Soil Sci., 53, pp. 244-246.

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, pp. 225-236.

SEGALEN P. - 1969 - Extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode de Endredy par irradiation à l'ultra-violet des solutions oxaliques. Document multigr. ORSTOM.

SEGUY L. - 1969 - Etude pédologique du bassin versant de Salikénié en moyenne Casamance. - Document multigr. C.N.R.A. Bambey (Sénégal).

SIBAND P. - 1974 - Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. - Bambey, IRAT, CNRA, Sénégal, 31 p.

SMART P. - 1966 - Particle arrangements in kaolin. - Clays and clay minerals, 15, pp. 241-254.

STOOPS G. - 1968 - Micromorphology of some characteristical soils of the lower Congo (Kinshasa). - Pédologie, 18, pp. 110-149.

SUMMER and REEVE - 1966 - The effect of iron oxide impurities on the positive and negative adsorption of chloride by kaolinite. - J. Soil Sci., 17, pp. 274-279.

SYS C. - 1967 - The concept of ferrallitic and fersiallitic soils in Central Africa. Their classification and their correlation with the 7 th approximation. - Pédologie, 17, pp. 284-325.

TAMM O. - 1922 - Meddel stat. - Skogsforsakaust. 19, 385.

TAYLOR H. M. - 1972 - Effect of drying on water retention of puddled soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, pp. 972-973.

TESSIER D. - 1975 - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. - Thèse C. N. A. M., Paris, 231 p.

TESSIER D., PEDRO G. - 1976 - Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. - Science du Sol n° 2, pp. 85-99.

TESSIER F., FLICOTEAUX R., LAPPARTIENT J. R., NAHON D., TRIAT J. M. - 1975 - Réforme du concept de Continental terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'ouest africain. - Congr. int. de sédimentologie de Nice.

THOMANN C. - 1964 - Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'ouest africain. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., II, 3, pp. 43-69.

THOMAS G. W. and COLEMAN N. T. - 1964 - The fate of exchangeable iron in acid clay systems. - Soil Sci., 97, 4, pp. 229-232.

TOBIAS C. - 1965 - Contribution à l'étude du passage des sols beiges aux sols rouges : étude d'une toposéquence dans la région de Séfa (Sénégal - Casamance). - ORSTOM, Dakar-Hann, 113 p. multigr.

TOBIAS C. - 1968 - Mesure au laboratoire de la perméabilité de sols non remaniés. - Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, 2, pp. 251-257.

TOWNSEND F. C., REED L. W. - 1971 - Effect of amorphous constituents on some mineralogical and chemical properties of a Panamian latosol. Clays and clay. Min., 19, pp. 303-310.

TROCHAIN J. - 1941 - Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. - Ann. IFAN. n° 2, Dakar.

U. S. D. A. SOIL CONSERVATION SERVICE.
1960 - Soil classification - a comprehensive system. (7 th. approximation).
1967 - Supplement to soil classification system, 7 th. approximation.

VAN RAIJ B., PEECH M. - 1972 - Electrochemical properties of some oxisols and alfisols of the topic. - Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, pp. 587-593.

VAN WANBEKE A. - 1974 - Les propriétés agricoles des oxisols. - Pédologie, XXIV, 2, pp. 191-195.

VERRET F. - 1973 - Contribution à l'étude des phénomènes de lessivage. Analyses et interprétations obtenues au cours des premières recherches expérimentales. Mém. DEA, Lab. Géol. dyn., Université Paris 6, 36 p. multigr.

VIEILLEFON J. - 1974 - Contribution à l'étude de la pédogénèse dans le domaine fluvio-marin en climat tropical d'Afrique de l'Ouest. Importance du comportement géochimique du soufre dans l'acquisition et le développement des caractères pédologiques. - Thèse, Paris, 362 p. multigr.

WACKERMANN J. M. - 1966 - Les techniques d'étude microstructurales utilisées au centre de Hann-Dakar - Bull. Bibl. Pédol. ORSTOM, XV, 1, pp. 18-23.

WACKERMANN J. M. - 1975 - L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. - Thèse sci. Strasbourg, 373 p. multigr.

WATSON J. R. - 1971 - Ultrasonic vibration as a method of soil dispersion. Soils and Fertilizers, 34, 2, pp. 127-134.

LISTE DES TABLEAUX

1ère Partie

Chapitre 1 - page

Tableau 1-1. Caractéristiques des grès argileux du "Continental Terminal" supérieur. 14

Chapitre 2 -

Tableau 2-1. Intensité et énergie cinétique des pluies à Séfa, leur utilisation pour une appréciation de l'importance de l'érosion (selon CHARREAU et NICOU. 1971). 42

Tableau 2-2. Influence comparée des diverses couvertures végétales sur le ruissellement et sur l'érosion - Moyennes pondérées pour la période 1954-1968 - selon CHARREAU et NICOU (1970). 50

Tableau 2-3. Production annuelle d'acides aliphatiques hydrosolubles (en kg/ha). 54

Chapitre 3 -

Tableau 3-1. Inventaire des types de distribution de sols. 68

2me Partie

Chapitre 5 -

Tableau 5-1. Répartition des profils de la toposéquence de Salikenié. 88

Tableau 5-2. Principales caractéristiques morphologiques du sol rouge. 92

Tableau 5-3. Granulation, texture et humidité du sol rouge en saison sèche. 94

Tableau 5-4. Principales caractéristiques morphologiques du sol de transition. 101

Tableau 5-5. Principales caractéristiques morphologiques du sol de transition. 109

Tableau 5-6. Evolution de la couleur des sols rouges après leur mise en culture. 114

Chapitre 6 -

Tableau 6-1. Relation entre les taux d'argile granulométrique et les appréciations tactiles de la texture. 138

Tableau 6-2. Les causes de la distorsion entre l'appréciation tactile de la texture et les résultats de l'analyse granulométrique. 143

Chapitre 7 -

Tableau 7-1. Analyse totale de quelques échantillons de sol rouge et beige. 150

Tableau 7-2. Résultats de l'analyse triacide. 151

Tableau 7-3. Quantités de matière organique cumulées sur 2 mètres d'épaisseur (en kg/m^2). 164

Tableau 7-4. Concentration des différentes fractions organiques dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture de 40 à 50 cm (PERRAUD, 1972). 167

Chapitre 8 -

Tableau 8-1. Variations des états d'engorgement dans les horizons des profils étudiés. 219

Tableau 8-2. Occupation de la macroporosité par l'eau et par l'air. 220

Tableau 8-3. Turbidité des liquides percolés. 227

Tableau 8-4. Vitesses de filtration dans les échantillons de sols maintenus sous forêt. 228

Tableau 8-5. Vitesses de filtration dans les échantillons de sols cultivés. 230

Chapitre 9 -

Tableau 9-1. Relations entre les variations verticales du taux d'argile granulométrique et les données micromorphologiques. 270

Tableau 9-2. Distribution des glébules. 288

Tableau 9-3. Distribution des formes cutaniques. 290

Tableau 9-4. Distribution des actions biologiques. 292

3me Partie

Chapitre 10 -

Tableau 10-1. Présentation des différents types de traitement utilisés. 301

Tableau 10-2. Constitution granulométrique %. Matériau micronodulaire d'horizon B 2 de sol rouge. 305

Tableau 10-3. Constitution granulométrique %. Matériau nodulaire de l'horizon B 21 de sol de transition. 306

Tableau 10-4. Constitution granulométrique %. Matériau dépourvu de nodules et décoloré d'un horizon B 1 de sol beige. 307

Tableau 10-5. Quantités de substances extraites par les différents traitements (en % de la terre totale). 309

Tableau 10-6. Teneurs en kaolinite de chaque fraction granulométrique obtenue par les différentes méthodes à partir de l'échantillon de sol rouge. 316

Tableau 10-7. Teneurs en kaolinite de chaque fraction granulométrique obtenue par les différentes méthodes, à partir de l'échantillon de matériau nodulaire de sol de transition. 317

Tableau 10-8. Teneurs en kaolinite de chaque fraction granulométrique obtenue par différentes méthodes à partir de l'échantillon de sol beige. Matériau sans nodule, décoloré, de l'horizon B1 de sol beige. 318

Tableau 10-9. Quantités d'argile dispersée et organisations microscopiques. 322

Tableau 10-10. Constitution des fractions argileuses extraites du sol rouge et du sol beige par la méthode "D. B. H_2O_2 électro" (exprimées en % de la fraction argileuse). 328

Tableau 10-11. Composition des assemblages, de 50 à 200 µ de diamètre, extraits du sol rouge. 332

Tableau 10-12. Abondance et teneurs en Fe_2O_3 des nodules et du fond matriciel dans le sol de transition. 334

Tableau 10-13. Teneurs en kaolinite des nodules et du fond matriciel du sol de transition. 335

Tableau 10-14. Teneurs en argile granulométrique des nodules et du fond matriciel du sol de transition (exprimées en % du matériau déferrifié) 336

Tableau 10-15. Granulométries des quartz dans les nodules et dans le fond matriciel du sol de transition. 336

Tableau 10-16. Taux d'argile dispersée par différentes méthodes à partir des nodules et du fond matriciel. 338

Tableau 10-17. Variations affectant l'argile libre et le matériau inclus dans les glébules. 343

Tableau 10-18. Evolution de l'argile immobilisée dans les micronodules. 344

Tableau 10-19. Valeurs médianes de la résistance à l'écrasement des agrégats (exprimée, pour chaque agrégat, en grammes). 347

Tableau 10-20. Retrait maximum constaté. 360

Tableau 10-21. Comportement des matériaux beige et rouge soumis au compactage : taux d'argile "équivalente" et granulométrique. 366

Chapitre 11 -

Tableau 11-1. Les argiles extraites du sol rouge et du sol beige - Leurscaractéristiques de comportement en suspension - leur teneur en fer et leur surface spécifique. 373

Tableau 11-2. Isotropie du retrait et indices d'orientation des néo-agrégats. 375

Tableau 11-3. Gonflement potentiel et dispersabilité de néo-agrégats. 376

Tableau 11-4. Variation du gonflement potentiel des agrégats de sol rouge par l'effet du traitement TAMM. 380

Tableau 11-5. Valeurs moyennes des capacités d'échanges mesurées avant et après traitement "Tamm obscurité". 381

Tableau 11-6. Influence de divers cations sur la stabilité des agrégats (selon MONNIER, 1965). 383

Tableau 11-7. Références des couleurs des argiles enrichies en Fe_2O_3 (Munsell Soil color Charts, 1954). 385

Tableau 11-8. Variations de l'isotropie du retrait de la kaolinite en fonction de la teneur en Fe_2O_3 (Kaolinite Ca). 386

Tableau 11-9. Relation entre les teneurs en fer et l'indice d'orientation (Kaolinite Ca). 388

Tableau 11-10. Volume spécifique apparent et gonflement potentiel des agrégats artificiels (Kaolinite Ca). 389

Tableau 11-11. Analyse granulométrique des agrégats artificiels (Kaolinite Ca). 390

Tableau 11-12. Degré d'orientation et aptitude au gonflement (Kaolinite H). 391

Tableau 11-13. Fixation du fer et modification du complexe absorbant du sol beige. 394

Tableau 11-14. Fixation du fer et modification du retrait potentiel. 396

Tableau 11-15. Fonctionnement des colonnes en présence d'une armature de sables grossiers quartzeux. 400

Tableau 11-16. Fonctionnement des colonnes en l'absence d'armature. 401

Tableau 11-17 Fonctionnement des colonnes de sols rouges soumis à des alternances de percolation par des solutions oxaliques (à différentes concentrations) et par l'eau. 404

Tableau 11-18. Effet de la dessiccation sur le temps de passage de 50 cm^3 d'eau et sur la quantité d'argile entraînée. 406

4me Partie

Chapitre 12 -

Tableau 12-1. Modification des relations : "Fer-Argile" et "Plasma-Squelette". 424

Chapitre 13 -

Tableau 13-1. Relation théorique entre l'humidité relative de l'air, le potentiel matriciel et le diamètre équivalent des pores à l'équilibre. 427

Tableau 13-2. Variation des conditions pédohydriques dans la toposéquence et la séquence de sols rouges cultivés. 430

Tableau 13-3. Influence de l'ultradessiccation sur les matériaux nodulaires rouges. 437

Tableau 13-4. Variations successives de l'état d'association du fer et de la kaolinite. 441

Chapitre 14 -

Tableau 14-1. Les deux voies d'évolution des sols rouges en climat contrasté. 474

Tableau 14-2. Comparaison des toposéquences "contrastées" et "différenciées". 489

LISTE DES FIGURES

page

Fig. 1. La Casamance : sa situation dans la République du Sénégal. 3

Chapitre 1 -

Fig. 1-1. Situation de la Casamance sur la carte géologique à l'échelle du 1/5 000 000. 10

Fig. 1-2. Distribution des sols rouges et beiges sur les reliefs de plateau et d'interfluves. 10

Fig. 1-3. Coupe schématique du 2me niveau induré sur le versant de la vallée de Salikenié. 20

Fig. 1-4. Orientation des failles à différentes échelles. 24

Fig. 1-5. Interprétation graphique des crues des nappes phréatiques pour 3 puits de moyenne Casamance (selon GOUZE, 1969). 28

Chapitre 2 -

Fig. 2-1. Isohyètes normales trentenaires (selon GOUZE, 1969) 38

Fig. 2-2. Histogrammes climatiques (station de Séfa). 40

Fig. 2-3. Variations journalières de la température du sol sous différents couverts végétaux, en fonction de la profondeur. 46

Fig. 2-4. Variations journalières de la température du sol, à 5 cm de profondeur selon l'état de la surface. 47

Fig. 2-5. Variations annuelles de la température du sol sous différents couverts végétaux. 47

Chapitre 3 -

Fig. 3-1. Carte de distribution des sols à l'échelle de 1/1 000 000. 60 bis

Fig. 3-2. Distributions des sols selon la latitude. 65 bis

Fig. 3-3. Coupes correspondant aux différents types de distribution des sols. 65 bis

Chapitre 4 -

Fig. 4-1. Coupe des toposéquences de Salikenié et de Kounkali. 81

Fig. 4-2. Notations de couleur dans la toposéquence de Salikenié. 84

Chapitre 5 -

Fig. 5-1. Distribution relative des nodules et des pédotubules dans le sol de transition. 100

Fig. 5-2. Morphologie des profils type de sol rouge, sol de transition et sol beige. 120 bis

Chapitre 6 -

Fig. 6-1. Granulométrie de 4 profils caractéristiques de la toposéquence de Salikenié. 126

Fig. 6-2. Rapports : sable fin/sable grossier (toposéquence de Salikenié). 128

Fig. 6-3. Courbes cumulatives à abscisses (taille des grains) logarithmiqueset ordonnées (pourcentages cumulés) gaussiennes. 130

Fig. 6-4. Variations verticales des taux d'argile dans les sols cultivés. 131

Fig. 6-5. Variations verticales de l'argile granulométrique et de la texture en relation avec la distribution des granules, nodules et concrétions dans les profils observés sous forêt. 137

Fig. 6-6. Distribution des distorsions "granulométrie-texture", dans le paysage. 140

Fig. 6-7. Variations verticales de l'argile granulométrique et de la texture en relation avec la distribution des granules et nodules (sousculture).

Fig. 6-8. Taux d'argile granulométrique et humidité à pF 3. 145

Chapitre 7 -

Fig. 7-1. Variations verticales des teneurs en fer "total" et en argile dans 4 sols de la toposéquence de Salikenié. 155

Fig. 7-2. Variations verticales des teneurs en fer "total" et en argile dans la séquence d'évolution des sols rouges sous culture. 157

Fig. 7-3. Courbes d'extraction du fer "amorphe" (méthode SEGALEN, 1968). 158

Fig. 7-4. Variations verticales de la matière organique sous forêt. 161

Fig. 7-5. Distribution verticale de la matière organique dans les sols cultivés. 163

Fig. 7-6. Répartition des différentes fractions organiques dans les profils. 166

Fig. 7-7. Variations verticales de la capacité d'échange, de l'argile granulométrique et de la matière organique sous forêt. 169

Fig. 7-8. Variations verticales de la capacité d'échange, de l'argile granulométrique et de la matière organique dans les sols rouges sous forêt et sous culture. 171

Fig. 7-9. Variations verticales des pH et de la matière organique sous forêt. 174

Fig. 7-10. Variations latérales du pH KCl dans la toposéquence de Salikenié. 175

Fig. 7-11. Variations latérales du pH KCl dans la toposéquence de Kounkali. 176

Fig. 7-12. Variations du pH KCl dans la séquence de transformation des sols rouges sous culture. 177

Fig. 7-13. Variations verticales des bases échangeables sous forêt. 179

Fig. 7-14. Variations verticales des bases échangeables dans les sols rouges cultivés. 180

Chapitre 8 -

Fig. 8-1. Porosité des sols : rouge, beige et de transition sous forêt et des sols rouges cultivés. 187

Fig. 8-2. Porosité des prélèvements de dimensions millimétriques, centimétriques et décimétriques. 189

Fig. 8-3. Compositions volumiques des sols sous forêt et sous culture. 195 à 197

Fig. 8-4. Bilans climatiques théoriques et variations des stocks d'eau dans deux sols (rouge et beige) situés sous forêt . 202

Fig. 8-5. Régime hydrique des sols rouges et des sols beiges, sous forêt et sous culture. 205 à 207

Fig. 8-6. Profils hydriques au maximum de dessiccation. 212

Fig. 8-7. Variations des humidités volumiques dans les différentes couches des sols au cours de l'année climatique. 214 à 217

Fig. 8-8. Valeurs moyennes, minimales et maximales de la vitesse de filtration. 229

Fig. 8-9. Relations entre la vitesse de filtration et la porosité grossière. 232

Fig. 8-10. Allure générale des courbes de variation de la vitesse de filtration en fonction du temps dans les matériaux de sols rouges et beiges. 234

Chapitre 9 -

Fig. 9-1. Schéma de l'évolution "glébulaire". 287

Chapitre 10 -

Fig. 10-1. Distributions granulométriques obtenues par la méthode "D. B. H_2O_2 electro" directement et après traitement "JEFFRIES". 314

Fig. 10-2. Courbes d'analyse thermogravimétrique et thermique différentielle. 315

Fig. 10-3. Taux d'argile granulométrique et de kaolinite dans 3 sols de la toposéquence et 3 sols rouges de la séquence de transformation sous culture. 324

Fig. 10-4. Variations verticales décelées par l'analyse des nodules rouges et de la matrice beige séparés à la main dans le sol de transition. 341

Fig. 10-5. Ségrégation des oxyhydrates de fer et de la kaolinite dans les ferri-argilanes et dans le sol de transition. 341

Fig. 10-6. Taux d'agrégats grossiers stables dans les différents sols. 350

Fig. 10-7. Taux de (A + L) obtenus avec et sans prétraitement benzène. 351

Fig. 10-8. Rapport des taux de (A + L) les plus faibles (eau) aux plus élevés (benzène). 352

Fig. 10-9. Variations verticales du retrait potentiel dans le sol rouge et dans le sol beige. 363

Fig. 10-10. Courbes "Proctor" caractéristiques des horizons B 2 de sol rouge et B 21 de sol beige. 364 bis

Fig. 10-11. Courbes "Proctor" caractéristiques du matériau de l'horizon B 2 de sol rouge comparées à celles d'échantillons de référence de teneurs en argile connues. 364 ter

Chapitre 11 -

Fig. 11-1. Préparation des galettes d'argile. 372

Fig. 11-2. Ressuyage des galettes sur Büchner 385

Fig. 11-3. Spectres de rayons X réalisés sur les galettes de Kaolinite plus ou moins enrichies en fer. 386 bis

Fig. 11-4. Gonflement potentiel et dispersabilité des agrégats artificiels. 387

Fig. 11-5. Entraînement d'argile à partir d'une colonne de sol rouge (16 %) + billes (84 %), percolée par l'acide oxalique puis par l'eau. 403

Fig. 11-6. Entraînement d'argile à partir d'une colonne de sol rouge percolée alternativement par la solution oxalique et par l'eau. 404

Fig. 11-7. Variations de l'entraînement par l'eau après arrêt de percolation et un séchage à l'étuve à 45°. Variations du temps 406

Fig. 11-8 Variations du temps de percolation et du poids d'argile entrainée 407

Chapitre 12 -

Fig. 12-1. Bilan semi-quantitatif des organisations plasmiques. 412

Fig. 12-2. Bilan semi-quantitatif global. 415

Fig. 12-3. Comportement et dynamique globale du fer. 418

Fig. 12-4. Comportement et dynamique du fer associé au plasma. 419

Fig. 12-5. Variations de l'association : plasma-squelette. 422

Chapitre 13 -

Fig. 13-1. Modalités de l'humectation des sols rouges et des sols beiges. 429

Fig. 13-2. Représentation schématique de la structure micronodulaire. 432

Fig. 13-3. Relations entre la dissociation de l'argile et le pH KCl. 438

Fig. 13-4. Variations de l'équilibre des bases échangeables Ca et Mg. 439

Fig. 13-5. Propagation des sols beiges dans la toposéquence. 448

Fig. 13-6. Développement de l'hydromorphie et de la disjonction du fer et de l'argile dans la toposéquence. 449

Fig. 13-7. Intervention du tassement au cours de la différenciation du sol beige. 451

Fig. 13-8. Formation et évolution des microcuvettes. 452

Fig. 13-9. Comparaison de la propagation de l'ultradessiccation et des transformations qui en résultent dans les sols cultivés et dans la toposéquence sous forêt. 455

Fig. 13-10. Etapes successives supposées de l'évolution d'un plateau de moyenne Casamance (cartes). 458

Fig. 13-11. Etapes successives de l'évolution d'un plateau de moyenne Casamance (coupes). 459

Chapitre 14 -

Fig. 14-1. Carte de distribution des 2 paramètres intervenant dans les déséquilibres bioclimatiques. 468

Fig. 14-2. Esquisse cartographique des contrastes climatiques. 469

Fig. 14-3. Disjonction "plasma-squelette" dans les sols rouges peu différenciés. 471

Fig. 14-4. Disjonction "plasma-squelette" dans les sols beiges différenciés. 472

Fig. 14-5. Esquisse schématique de la répartition des principaux types de sol à dominance de kaolinite en Afrique de l'Ouest. 477

Fig. 14-6. Déplacement latéral du gradient hydrique dans les toposéquences différenciées. 485

Fig. 14-7. Direction et vitesse de propagation de l'évolution latérale. 486

Fig. 14-8. Comparaison des évolutions du sol rouge dans l'espace et dans le temps. 487

TABLE DES MATIERES

RECHERCHES SUR LA TRANSFORMATION DES SOLS FERRALLITIQUES DANS LA ZONE TROPICALE A SAISONS CONTRASTEES.

Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Sénégal)

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

1ère Partie

LE MILIEU NATUREL

page

INTRODUCTION 1

Chapitre 1 - Le substrat géologique, le modelé et les eaux 9

A - Aperçu géologique et caractéristiques de la roche mère des sols de moyenne Casamance. 9

1/ - Formations gréseuses du Continental terminal. 9
2/ - Roches mères des sols de Moyenne Casamance. 13
3/ - Conclusions. 17

B - Modelé et niveaux indurés. 17

1/ - Observations générales et disposition des niveaux indurés. 17
2/ - Interprétation géomorphologique. 23
3/ - Conclusions. 26

C - Eaux de profondeur et de surface. 27

1/ - Les nappes et leur fonctionnement actuel. 27
2/ - Ruissellement superficiel et hydrologie. 31
3/ - Composition chimique des eaux. 31
4/ - Conclusions. 33

Chapitre 2 - La végétation, le climat et l'action de l'homme 35

A - Végétation naturelle de Moyenne Casamance 35

B - Climat. 37

1/ - La pluviosité. 39

2/ - L'intensité des pluies et ses conséquences. 41

3/ - Les équilibres pluviothermiques et l'évapotranspiration potentielle. 43

C - Influence du couvert végétal et de l'intervention humaine sur le pédoclimat et l'évolution du sol. 45

1/ - Couvert végétal et régime thermique. 45

2/ - Couvert végétal et régime hydrique. 48

3/ - Couvert végétal et cycle biogéochimique. 52

D - Conclusions. 55

Chapitre 3 - La distribution des sols rouges et des sols beiges en Casamance et dans les régions avoisinantes 57

A - Distribution zonale et régionale des sols rouges et des sols beiges. 59

B - Distribution paysagique des sols rouges et beiges. 65

1/ - Variation sur un axe Sud-Nord, allant de la frontière de Guinée Bissau jusqu'à la région du Sine Saloum. 65

2/ - Variation de la distribution des sols dans la région de Sedhiou et de Séfa (Sud de la moyenne Casamance). 70

C - Distribution des sols en fonction de l'occupation humaine. 71

1/ - Implantation humaine moderne et culture mécanisée : Station expérimentale de Séfa, C. G. O. T., S. O. D. A. I. C. A. 72

2/ - Implantation humaine traditionnelle et culture manuelle. 72

D - Conclusion : choix des toposéquences et séquences de sols étudiées. 74

2ème Partie

ETUDE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS

INTRODUCTION 77

Chapitre 4 - Présentation des toposéquences associant sols rouges et sols beiges sous forêt, et de la séquence de sols rouges cultivés. 79

1/ - Les toposéquences. 79

2/ - La séquence de sols rouges cultivés. 85

Chapitre 5 - Caractéristiques morphologiques des sols. 87

A - Principaux types de sols de la toposéquence sous forêt et leurs variations latérales. 88

1/ - Les sols rouges. 88
2/ - Les sols de transition. 96
3/ - Les sols beiges. 104

B - Comparaison avec les sols cultivés en fonction de l'ancienneté de leur mise en culture. 112

1/ - Modification du sol rouge consécutive à la déforestation. 112
2/ - Modification du sol beige consécutive à la déforestation. 118
3/ - Conclusions. 118

C - Conclusions de l'étude morphologique. 120

Chapitre 6 - Caractéristiques granulométriques des sols. 123

1/ - Objectifs. 123
2/ - Méthode utilisée. 124
3/ - Résultats. 125
4/ - Identification des fractions séparées par l'analyse granulométrique. 132
5/ - Interprétation des résultats. 135
6/ - Conclusions. 147

Chapitre 7 - Caractéristiques chimiques des sols. 149

A - Caractéristiques chimiques globales. 149

1/ - Données générales sur quelques sols de la région de Séfa. 149
2/ - Distribution et forme du fer. 154
3/ - Conclusions. 159

B - Caractéristiques organiques des sols. 160

1/ - Teneurs en matière organique. 160
2/ - Compositions et types de matière organique. 164
3/ - Conclusions. 168

C - Caractéristiques physico-chimiques du complexe absorbant. 168

1/ - Capacité d'échange. 168
2/ - pH . 172
3/ - Bases échangeables. 177
4/ - Conclusions. 181

Chapitre 8 - Caractéristiques porosimétriques et fonctionnement hydrique des sols. 183

A - Caractéristiques porosimétriques. 184

1/ - Méthodes utilisées. 184
2/ - Résultats. 186
3/ - Relations avec les données morphologiques. 191
4/ - Conclusions. 192

B - Variations de la composition volumique. 192

1/ - Méthodes utilisées. 192
2/ - Résultats. 194
3/ - Conclusion . 199

C - Bilans et régimes hydriques. 200

1/ - Méthodes utilisées.
2/ - Les résultats. 201
3/ - Interprétation générale. 218
4/ - Conclusions. 225

D - Essais de comportement des matériaux soumis à l'action de l'eau (méthode "Vergière"). 226

1/ - Méthode utilisée. 226
2/ - Résultats. 227
3/ - Conclusions. 235

Chapitre 9 - Les données de l'analyse microscopique. 239

A - L'organisation microscopique du sol rouge. 242

1/ - Analyse microscopique des horizons profonds B 3 et B 2. 242
2/ - Analyse microscopique des horizons supérieurs B 1, AB et A, constituant l'apexsol. 248
3/ - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol rouge. 252

B - L'organisation microscopique du sol de transition. 255

1/ - Analyse microscopique des horizons profonds B 3, B 22 et B 21. 255
2/ - Analyse microscopique des horizons B 1, AB et A constituant l'apexsol. 266
3/ - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol de transition. 269

C - L'organisation microscopique des sols rouges cultivés. 272

D - L'organisation microscopique du sol beige. 273

1/ - L'analyse microscopique des horizons profonds : B 3, B 22 et B 21 formant l'infrasol. 273

2/ - L'analyse microscopique des horizons supérieurs B 1, AB et A, constituant l'apexsol. 278
3/ - Relations avec les autres données analytiques et conclusions sur l'organisation du sol beige. 282

E - Conclusions : les relations entre les sols rouges et les sols beiges. 284

1/ - Les principales organisations, leurs distributions et leurs relations. 284
2/ - Les transformations de ces organisations. 293
3/ - Conclusions : l'apport des analyses microscopiques. 295

3me Partie

ETUDE DES MECANISMES RESPONSABLES DE L'ETAT D'ORGANISATION ET DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX PEDOLOGIQUES.

INTRODUCTION 297

Chapitre 10 - Approche d'une étude de l'organisation par des voies analytiques spéciales. Extraction des différents assemblages caractéristiques, leur stabilité et leur cohésion. 299

A - Utilisation des analyses granulométriques sélectives à l'étude de la réactivité des agglomérats caractéristiques des sols. 299

I - Recherche d'une méthodologie analytique. 299
1/ - Principes de la méthode adoptée. 299
2/ - Présentation des différents types de traitements utilisés. 300
3/ - Application à 3 échantillons caractéristiques des sols de la séquence étudiée : étude comparative et signification des données granulométriques obtenues. 304

II - Application à quelques profils caractéristiques - Résultats et interprétation. 323
1/ - Application à divers sols des séquences étudiées. 323
2/ - Etude comparative de la constitution des fractions isolées par les différentes méthodes : leur variation verticale, sa signification. 327

B - Utilisation de différents tests, et en particulier de la méthode d' "analyse d'agrégats", à l'étude de la stabilité physique et des caractéristiques mécaniques des assemblages. 345

1/ - Tests de cohésion. 345
2/ - Analyse d'agrégats. 348
3/ - Appréciation du gonflement et du retrait. 360
4/ - Test de compactage. 364

Chapitre II - Approche d'une étude de l'organisation par voie expérimentale. Problème du masquage et du démasquage de la kaolinite. 369

A - Etudes expérimentales portant sur la fabrication et la transformation des agrégats de kaolinite. 370

I - Etude des possibilités de réagrégation, et de transformation du mode d'assemblage, de l'argile des sols rouge et beige de Casamance. 371

1/ - Réactivité des argiles extraites du sol rouge et du sol beige. 371
2/ - Etude comparée de l'action de l'eau et du réactif de TAMM sur l'organisation et sur le comportement des agrégats de sol rouge. 379

II - Etude de l'adjonction contrôlée de fer à une kaolinite de gisement (Bassin de Provins). 382

1/ - Données bibliographiques. 382
2/ - Etude de la ferruginisation d'une kaolinite Ca. 384
3/ - Etude de la ferruginisation de la kaolinite H. 390

III - Etude de l'action des solutions ferriques sur le comportement d'un échantillon de sol beige ; problème de la ferrisation de la kaolinite du sol. 392

B - Etudes préliminaires sur le fonctionnement de systèmes reconstitués en colonnes, à partir d'agrégats de sol rouge, soumis à des percolations dans des conditions physiques et physiochimiques variées. 398

1/ - Première série d'expériences : dissociation et fonctionnement 400
2/ - Deuxième série d'expériences : intervention de la dispersion 402
3/ - Troisième série d'expériences : rôle de la dessiccation 405

4 me Partie

INTERPRETATION D'ENSEMBLE

Chapitre 12 - Synthèse morphologique et réalité des filiations pédologiques en moyenne Casamance. 409

A - Bilan général des transformations observées dans les topo-séquences : sol rouge - sol beige. 411
1/ - Bilan des organisations plasmiques. 411
2/ - Estimation du bilan global. 416
3/ - Comportement et dynamique globale du fer. 417

B - Etude des relations au sein du système "argile-fer-squelette". 419
1/ - Relations "argile-fer". 419
2/ - Action du fer sur l'état d'organisation "plasma-squelette". 421
Conclusions 423

Chapitre 13 - Conditions générales de la transformation des sols rouges de Casamance. Modalités de la propagation des phénomènes. 425

A - Considérations sur les mécanismes de la transformation des sols rouges. 425
1/ - L'évolution des conditions pédohydriques et l'importance du phénomène d' "ultradessiccation". 425
2/ - Conséquences microstructurales et physico-chimiques de l' "ultradessiccation". 431
3/ - Aperçu général sur la dynamique du phénomène. 440

B - Les modalités de la propagation des transformations : les deux grandes voies de l'évolution des sols rouges. 442
1/ - La propagation des sols beiges en Casamance. 443
2/ - L'individualisation des sols sableux au Sénégal sur les matériaux du "Continental terminal". 462

Chapitre 14 - Raisons et enseignements des phénomènes de déferrallitisation. Importance dans la zone tropicale à saisons contrastées de l'Afrique de l'Ouest. 465

A - Nature et extension de la déferrallitisation. 465
1/ - Déséquilibres bioclimatiques et déstabilisation des sols ferrallitiques en climats contrastés. 465
2/ - La disjonction consécutive "plasma-squelette" et ses conséquences sur l'évolution des sols. 470

B - Considérations sur la distribution et le développement généralisé des sols sableux non différenciés dans l'Ouest africain. 476
1/ - Etude des relations "sol-pédoclimat" : les principaux domaines pédobioclimatiques de la zone tropicale à saisons contrastées. 476
2/ - Généralisation de la notion d'appauvrissement en argile et genèse des sols sableux peu différenciés. 481

C - Genèse des sols ferrugineux tropicaux lessivés de plateau, originalité de la "transformation toposéquentielle" par rapport aux autres toposéquences de la zone tropicale à climat contrasté. 484

1/ - Caractérisation de l'évolution latérale. Mise en évidence des toposéquences "différenciées". 484

2/ - Comparaison avec les autres toposéquences à dynamique latérale de la zone tropicale sèche et, en particulier, avec les toposéquences contrastées. 488

Conclusions générales. 491

BIBLIOGRAPHIE 497

LISTE DES TABLEAUX 513

LISTE DES FIGURES 519

TABLE DES MATIERES 525

Les Éditions de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer tendent à constituer une documentation scientifique de base sur les zones intertropicales et méditerranéennes, les pays qui en font partie et sur les problèmes posés par leur développement.

CAHIERS ORSTOM *(séries périodiques)*

- **biologie :** études consacrées à diverses branches de la biologie végétale et animale : agronomie, biologie et amélioration des plantes utiles, entomologie agricole, nématologie.
- **entomologie médicale et parasitologie :** systématique et biologie des arthropodes d'intérêt médical et vétérinaire, parasitologie, épidémiologie des grandes endémies tropicales, méthodes de lutte contre les vecteurs et les nuisances.
- **géologie :** pétrologie et cycles des éléments (géochimie) - hydrogéologie - altération et érosion - sédimentologie - stratigraphie - orogenèse continentale - métallogenèse - paléogéographie - structure et évolution des fonds océaniques.
- **hydrologie :** études, méthodes d'observation et d'exploitation des données concernant les cours d'eau intertropicaux et leurs régimes.
- **océanographie :** hydrologie, physico-chimie, hydrodynamique, écologie, caractérisation des chaînes alimentaires, niveaux de production, dynamique des stocks, prospection faunistique (Sud-ouest Pacifique, Canal de Mozambique et environs, Atlantique Tropical Est).
- **hydrobiologie :** physico-chimie, écologie, caractérisation des chaînes alimentaires, dynamique des stocks, action des insecticides sur la faune (Bassin Tchadien, Côte d'Ivoire).
- **pédologie :** problèmes soulevés par l'étude des sols : morphologie, caractérisation physico-chimique et minéralogique, classification, relations entre sols et géomorphologie, problèmes liés aux sels, à l'eau, à l'érosion, à la fertilité.
- **sciences humaines :** études géographiques, sociologiques, économiques, démographiques et ethnologiques.

MÉMOIRES ORSTOM : consacrés aux études approfondies (synthèses régionales, thèses...) dans les diverses disciplines scientifiques (82 titres parus).

ANNALES HYDROLOGIQUES : depuis 1959, deux séries sont consacrées : l'une, aux Etats africains d'expression française et à Madagascar, l'autre aux Territoires et Départements français d'Outre-Mer.

FAUNE TROPICALE : collection d'ouvrages principalement de systématique, pouvant couvrir tous les domaines géographiques où l'ORSTOM exerce ses activités (19 titres parus).

INITIATIONS/DOCUMENTATIONS TECHNIQUES : mises au point et synthèses au niveau, soit de l'enseignement supérieur, soit d'une vulgarisation scientifiquement sûre (27 titres parus).

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'ORSTOM : cette collection, diverse dans ses aspects et ses possibilités de diffusion, a été conçue pour s'adapter à des textes scientifiques ou techniques très variés quant à leur origine, leur nature, leur portée dans le temps ou l'espace, ou par leur degré de spécialisation (48 titres parus).

Les études en matière de géophysique (gravimétrie, sismologie, magnétisme...) sont publiées, ainsi que certaines données (magnétisme) dans des séries spéciales : **GÉOPHYSIQUE** et **OBSERVATIONS MAGNÉTIQUES.**

L'HOMME D'OUTRE-MER : cette collection, exclusivement consacrée aux sciences de l'homme, est réservée à des textes d'auteurs n'appartenant pas à l'ORSTOM, mais dont celui-ci assure la valeur scientifique (co-édition Berger-Levrault) (10 ouvrages parus).

De nombreuses **CARTES THÉMATIQUES,** accompagnées de **NOTICES,** sont éditées chaque année, intéressant des domaines scientifiques ou des régions géographiques très variées.

BULLETIN ANALYTIQUE D'ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET VÉTÉRINAIRE (périodicité mensuelle ; ancienne dénomination jusqu'en 1970 : Bulletin signalétique d'entomologie médicale et vétérinaire) (XXIII[e] année).

O.R.S.T.O.M.

Direction générale :

24, rue Bayard - 75008 PARIS

Services Scientifiques Centraux :

Service Central de Documentation :

70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

I.T.O.A.-CAHORS — O.R.S.T.O.M. Editeur

Dépôt légal : 70081 — 1er trim. 1977

— I.S.B.N. 2-7099-0440-3 —