

LES SYSTEMES DE TRANSFORMATION EN PEDOLOGIE

R. BOULET *, R. CHAUVEL **, Y. LUCAS *

Il est difficile d'établir avec certitude l'époque à laquelle l'organisation latérale du sol a été perçue. Le premier à reconnaître et à étudier des distributions ordonnées liées à la topographie est MILNE (1934), ce qui l'a conduit à proposer la notion de catena. Il a été ensuite admis (BUSHNELL, 1942 et GREENE, 1945), que ces distributions ordonnées dans les paysages avaient une origine extérieure à chacun des différents profils pédologiques, pouvant y résider dans les variations de drainage le long des versants. On observait alors une liaison de cause à effet entre la topographie et la distribution des sols.

Ce n'est qu'à partir de 1972, avec les travaux de BOCQUIER (1972), que l'on s'aperçoit que la différenciation latérale du sol pouvait dépendre des mécanismes pédologiques eux-mêmes et même commander l'évolution du modelé. Ces résultats furent obtenus grâce à une analyse de l'organisation latérale du sol aussi complète que l'était jusque là celle du profil vertical. Les relations spatiales entre organisations à toutes échelles apparurent ainsi très importantes pour la compréhension de la genèse et de la dynamique des couvertures pédologiques.

Les études entreprises depuis lors dans le même esprit ont amené à introduire la notion de système de transformation, qui est donc assez récente, et à analyser un certain nombre de ces systèmes (BOULET, 1974 ; TURENNE, 1975 ; CHAUVEL, 1976 ; NAHON, 1976 ; M. RAUNET, 1978 et 1979 ; LE-PRUN, 1979 ; QUEIROZ NETO et al., 1981 ; LUCAS et al., 1983...).

Notion de système de transformation

La pédologie considère le sol en formation, puis en évolution sous l'effet de facteurs bioclimatiques qui, intervenant sur l'altérite, provoquent redistribution, restructuration et organisation en horizons. Dans les situations les plus fréquemment envisagées, ces horizons se succèdent verticalement en une suite qui correspond à une (ou plusieurs) séquences d'organisations élémentaires dérivant les unes des autres, et à orientation principalement verticale. Dans ces couvertures, les variations latérales sont généralement assez peu accentuées et progressives. Les horizons sont plus ou moins concordants avec les surfaces qu'il moulent. Les organisations élémentaires qui les caractérisent se forment et se renouvellent : on peut considérer que de telles couvertures sont en équilibre dynamique avec le milieu.

Cependant, si les conditions de milieu se modifient dans l'espace et/ou dans le temps, suffisamment pour que les conditions pédobioclimatiques sortent du domaine d'équilibre des organisations élémentaires, celles-ci deviennent instables : elles se transforment pour donner naissance à de nouvelles structures, en équilibre avec les nouvelles conditions pédobioclimatiques.

Dans les exemples dont nous disposons, ces transformations correspondent à l'apparition de nouvelles séquences d'organisations élémentaires qui interrompent, à un niveau variable, celles de la couverture initiale. Ces nouvelles organisations se succèdent de façon ordonnée, sont discordantes sur celles de la couverture initiale et se propagent latéralement aux dépens de cette dernière. Il se forme ainsi des ensembles organisés que l'on a appelés systèmes de transformation, parce qu'ils correspondent à la transformation d'une couverture initiale en une autre couverture à organisation et dynamique souvent très différente. Il faut toutefois préciser que le domaine où s'effectue actuellement cette transformation n'occupe souvent qu'une fraction réduite du paysage.

* Directeur de Recherches (R.B.) et Chargé de Recherches (Y.L.) à l'ORSTOM - Centre ORSTOM - B.P. 165 - 97305 Cayenne Cédex.

** Directeur de Recherches à l'ORSTOM - Instituto de Geociencias D.G.P., USP CP 20899, CEP 05508 Sao Paulo (Brésil).

Malgré le nombre encore limité de systèmes

de transformation actuellement identifiés, il est déjà possible de les ordonner les uns par rapport aux autres de diverses façons, par exemple en considérant les processus qui interviennent ou les structures qui les caractérisent. On a choisi d'adopter, pour exposer les exemples retenus, un ordre qui prend en compte l'importance des transferts latéraux internes et l'état des produits transportés. La présentation se limitera aux caractères principaux de l'organisation et de la dynamique des systèmes qui ont été exposés par ailleurs dans des articles auxquels il sera fait référence. Cette présentation se trouvera également affectée par les états d'avancement divers de ces études.

SYSTEMES DE TRANSFORMATIONS SANS TRANSFERTS LATÉRAUX INTERNES TRANSFORMATION DES SOLS ROUGES EN SOLS BEIGES (CASAMANCE, SENEGAL)

Le premier exemple a été étudié en Casamance, dans la province méridionale du Sénégal (CHAUVÉL, 1976). Les grès argileux du « Continental terminal », qui constituent les bas plateaux de cette région, sont composés uniquement de quartz, de kaolinite et d'hydrates ferriques. Ils portent des sols rouges et des sols beiges dont la distribution est ordonnée dans les paysages.

Organisation et dynamique

Dans la zone la plus humide, au sud-ouest de la Casamance (pluviosité de l'ordre de 1 200 mm, saison sèche tempérée par l'influence maritime), les sols rouges ferrallitiques sont seuls présents. L'étude microscopique met en évidence dans ces sols une série de filiations verticales, et de bas en haut, entre la roche mère et les principaux horizons pédologiques : B₃ rouge, argileux, présentant des formes nodulaires de dimensions centimétriques, rouges, à peine cimentés, entourées par des zonations blanchâtres — B₂, de 2,8 à 0,8 mètres de profondeur, rouge, argileux, caractérisé par la présence de quelques formes nodulaires centimétriques et surtout par la dominance de concentrations plasmiques argilo-ferriques, de très petites dimensions (100 µm) ou micronodules, très stables, assemblées en une charpente continue qui délimite de nombreux pores communicants et confère à l'horizon une forte porosité et perméabilité. B₁ de 0,8 à 0,4 mètre de profondeur, argilo-sableux, à structure massive à sous-

structure microgrenue, passant localement à polyédrique grossière — AB et A de 0,4 à 0 mètre, teintés par la matière organique, sablo-argileux puis sableux.

Lorsque les conditions deviennent plus sèches, comme en moyenne Casamance par exemple, les sols rouges ne sont plus seuls mais associés aux sols beiges qui se développent au centre des plateaux. Entre les sols rouges et les sols beiges est alors observée une étroite bande de sols de transition. Ces derniers sont caractérisés par l'existence de variations latérales de l'organisation morphologique, qui présentent des limites obliques et discordantes sur les horizons du sol rouge et qui se succèdent de façon ordonnée, comme cela est indiqué sur la figure 1.

A partir du sol rouge, les variations se manifestent d'abord en haut du profil par des couleurs plus jaunes — à peine plus loin, l'horizon B₁ est compact et massif : sa limite avec B₂ est alors marquée par la différenciation dans cet horizon, de nodules rouges, de dimensions centimétriques, dont les structures internes sont héritées du sol rouge ; ces nodules sont de plus en plus contrastées et individualisées de bas en haut, dans un fond matriciel qui s'éclaircit ; ils passent progressivement en profondeur, à une masse continue pénétrée par un réseau de galeries blanchâtres. A l'approche du sol beige, la variation latérale affecte à la fois les horizons superficiels qui deviennent plus sableux, l'horizon B₁ brun pâle et largement structuré et la partie plus profonde du profil où s'accroît la différenciation des nodules. Le sol beige lui-même présente, comme le sol rouge, une succession verticale d'horizons, mais on constate qu'il existe entre ces derniers et la roche mère des solutions de continuité qui résultent de l'intervention d'une transformation : ainsi, les microstructures du fond matriciel et des concrétions apparaissent héritées du sol rouge et non directement du grès sous-jacent.

De nombreuses mesures d'humidité, faites sur le terrain, montrent que ces variations latérales de la morphologie s'accompagnent de modifications importantes de la dynamique actuelle :

1) Les sols rouges sont caractérisés par un drainage régulier en profondeur et par le maintien d'une humidité voisine du point de flétrissement en saison sèche.

2) Les sols de transition se distinguent surtout par une tendance à se dessécher plus intensément que les autres lorsque les conditions deviennent arides ; il sont aussi affectés par des

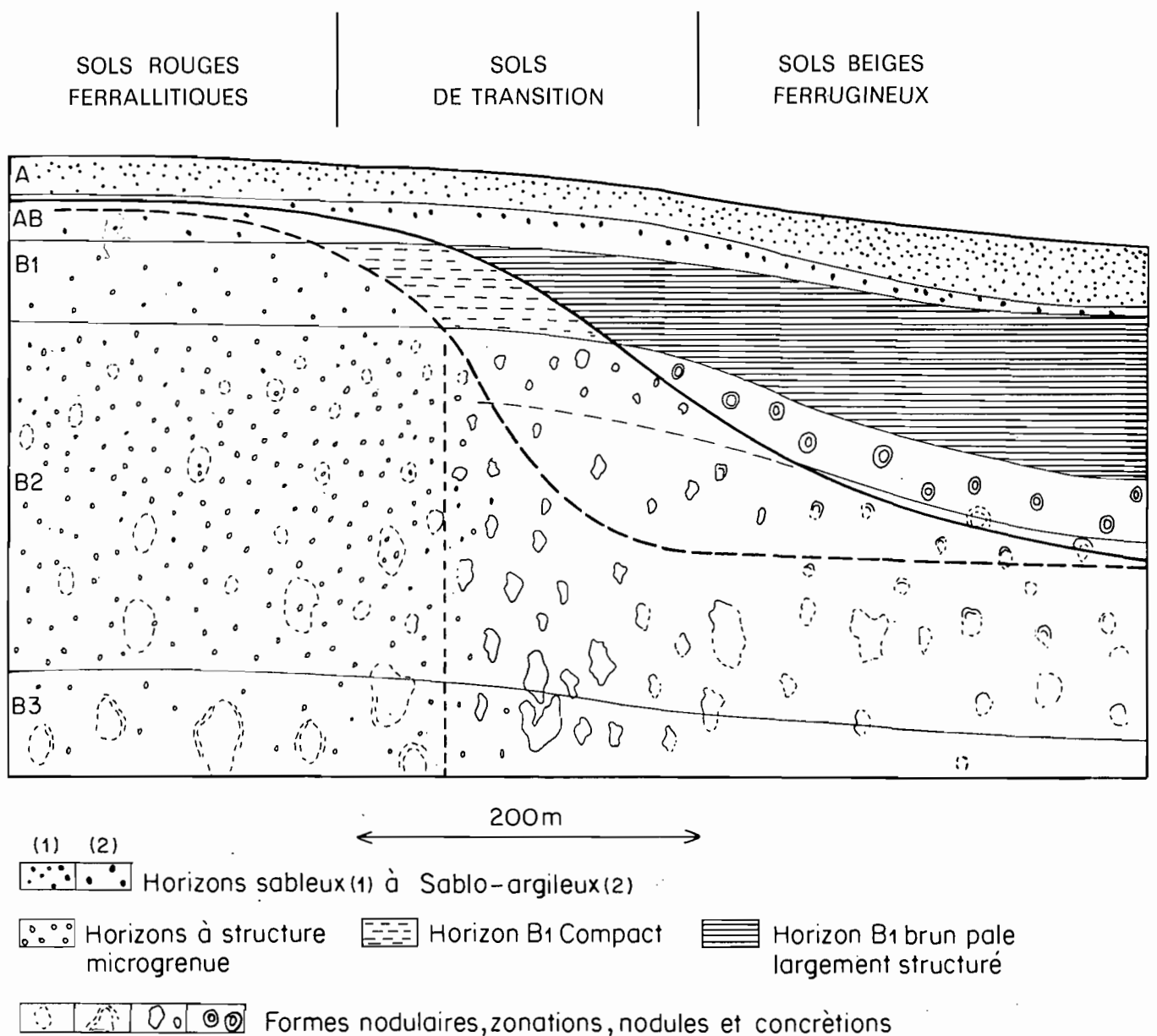


Fig. 1. - Relations entre les sols rouges ferrallitiques et les sols beiges ferrugineux dans la toposéquence.

engorgements de l'horizon B₁ en période pluvieuse.

3) Les sols beiges sont principalement caractérisés par une limitation du drainage vertical dans l'horizon B₁ et par des engorgements prolongés de la partie supérieure du profil.

Déterminisme

En se déplaçant des régions humides vers celles qui sont affectées par des saisons sèches de plus en plus marquées, on a constaté que l'évolution s'amorce au centre des plateaux et débute par les horizons de surface. Les fortes dessiccations

provoquent en ces emplacements la mise en œuvre de trois mécanismes qui apparaissent comme étant successifs et enchaînés :

1) Dislocation de la structure micronodulaire du sol rouge par l'effet des contraintes hydriques.

2) Mobilisation du fer ferrique, plus ou moins hydroxylé, fixé sur les sites d'échange de la kaolinite, par un mécanisme de nature physico-chimique lié à la dessiccation (CHAUVEL et PEDRO, 1978), entraînant la libération de la plus grande partie de l'argile, initialement bloquée.

3) Séparation de l'argile et des sables (disjonction « plasma-squelette ») découlant de la mi-

se en œuvre des conditions hydrodynamiques et permettant la redistribution dans le profil des constituants dissociés.

Il se produit ainsi d'abord un appauvrissement superficiel. En se propageant plus en profondeur, la dislocation de la structure micronodulaire s'accompagne d'un léger tassement, lui-même à l'origine d'un régime hydrique plus contrasté. Dans ces conditions, la « déferrisation » peut se réaliser et provoquer une dissociation irréversible des micronodules, puis la ségrégation généralisée du fer et de la kaolinite. Le tassement augmente et la transformation du système poral induit, plus en profondeur, une hydromorphie secondaire.

Ainsi, dans les zones déprimées par le tassement et où convergent les eaux de surface, se différencie un profil contracté, caractérisé par un fort gradient d'humidité. Ce gradient d'humidité est vertical dans le sol beige et latéral entre le sol beige et le sol rouge voisin. Et cette évolution amorcée verticalement, se propage par déplacement du gradient d'humidité, selon une direction centrifuge aux dépens des sols rouges qui ne subsistent qu'à la périphérie des plateaux lorsqu'on se déplace vers les régions affectées par des saisons sèches de plus en plus accentuées. On constate donc que la transformation est d'autant plus avancée que le climat est plus sec et contrasté.

Ces transformations pédologiques sont donc créatrices d'un micromodelé et, par l'extension centrifuge des zones déprimées, elles interviennent également sur l'évolution morphologique régionale. En effet, la carte pédologique (BALDENS-PERGER *et al.*, 1968) fait apparaître que lorsque l'on va vers des zones à saison sèche plus intense, les dépressions occupées par les sols beiges se rejoignent et gagnent la plus grande partie des plateaux aux dépens des sols rouges. De plus, l'insuffisance du drainage vertical dans les sols beiges provoque des écoulements superficiels à l'origine de l'établissement d'un réseau hydrique au centre des plateaux. Le recul et l'enfoncement de celui-ci entraîne la dissection des plateaux et leur évolution centrifuge, très caractéristique de ce système.

SYSTEME DE TRANSFORMATIONS AVEC TRANSFERT LATERAL INTERNE

Transferts sous forme figurée : systèmes eluviaux-illuviaux

L'exemple retenu a été étudié à Garango en Haute-Volta (BOULET, 1974).

Organisation et dynamique

En Haute-Volta méridionale (climat soudano-sahélien, pluviosité 900 mm), on observe au pied d'inselberg granitiques des couvertures pédologiques à fortes variations latérales dont l'organisation est représentée sur la figure 2 VI. On distingue :

— *Un domaine amont kaolinique*, constitué d'un sol ferrallitique rouge. L'étude microscopique montre que ce sol se forme par transformations successives (minéralogiques et structurales) à partir de la roche mère sous-jacente.

— *Un domaine médian sableux* à caractères morphologiques et géochimiques lessivés (domaine lessivé). Il est séparé du domaine amont par un front abrupt. Il apparaît en coin au contact du matériau d'altération, à la base du domaine amont qu'il recoupe obliquement, en discordance sur les horizons de ce dernier. La présence de reliques du domaine amont dans le domaine médian montre que celui-ci se développe aux dépens du premier, qui apparaît donc comme la « couverture initiale » du système ; l'obliquité du front séparant les deux domaines montre que la transformation progresse de l'aval vers l'amont et de bas en haut. Cette transformation consiste en une séparation du squelette et du plasma kaolino-ferrugineux, ce dernier étant exporté vers le bas et vers l'aval où il s'accumule.

— *Un domaine aval argileux* à caractères morphologiques et géochimiques illuviaux (domaine illuvié montmorillonitique). Il se décompose en un horizon inférieur qui tapisse le plancher de l'horizon lessivé et en plusieurs horizons en langue qui s'empilent les uns sur les autres, séparés par des horizons à caractères lessivés relictuels. L'horizon d'accumulation inférieur résulte de la décantation d'une partie du plasma kaolino-ferrugineux exporté du domaine amont. Les horizons en langue sont alimentés par un transport latéral en suspension dans la nappe piégée dans le domaine lessivé. Cette accumulation aval provoque un confinement en bases et en silice avec,

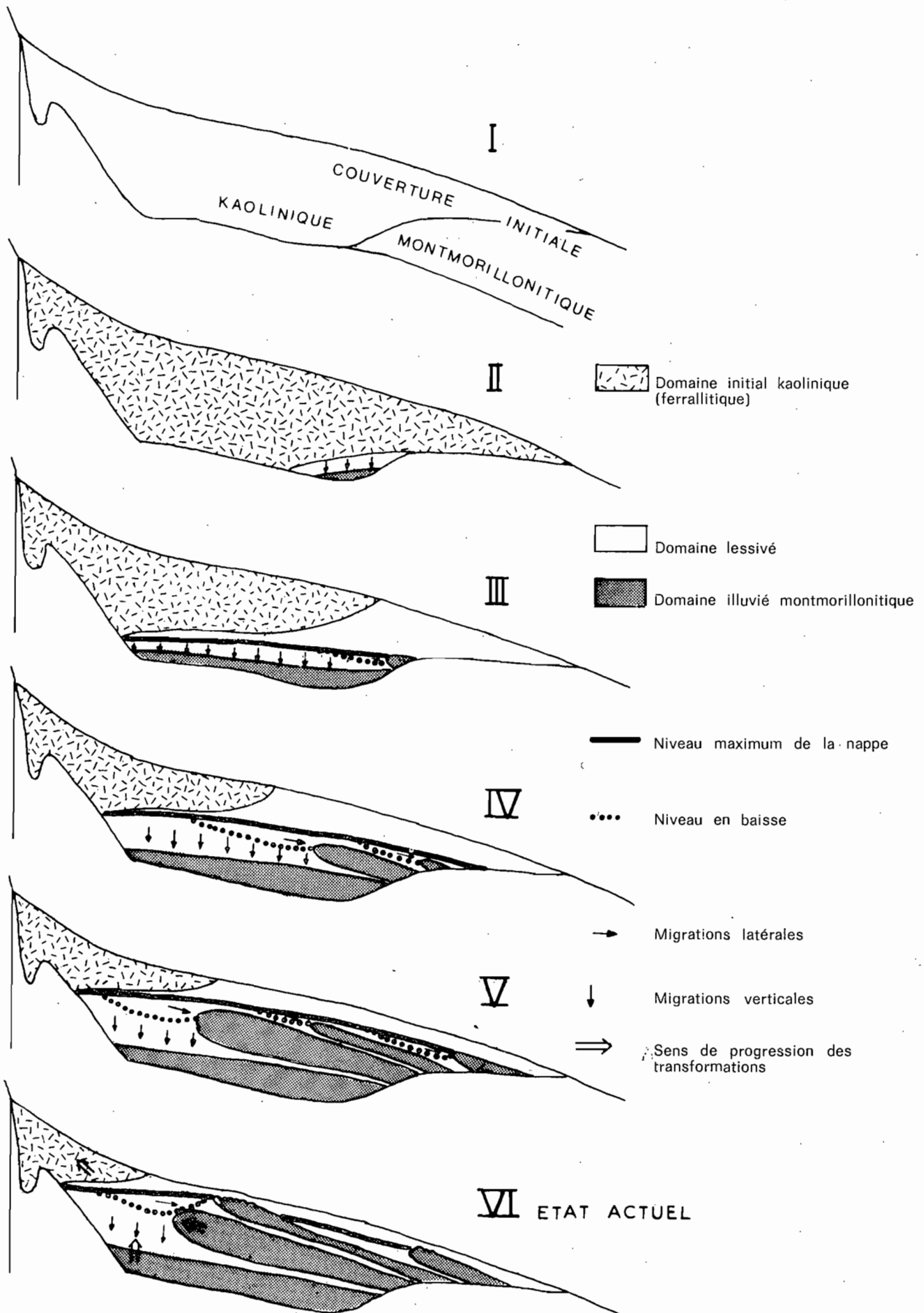


Fig. 2. — Stades d'évolution de la couverture pédologique de GARANGO reconstituée à partir de l'organisation et de la dynamique actuelles.

pour conséquence, une néoformation massive de montmorillonite. La figure 2 schématise les diverses étapes de cette transformation.

Déterminisme et systèmes apparentés

Les observations étalées en latitude et allant des couvertures ferrallitiques en équilibre aux systèmes de transformation permettent d'attribuer la mise en déséquilibre des premières à des *modifications climatiques*. Celles-ci induisent, à la fois directement et par le biais des variations de la végétation (forêt → savane), un régime hydrique du sol plus contrasté. Il s'ensuit des saturations localisées, apparaissant d'abord à l'aval et à la base du sol, et qui provoquent les premières disjonctions « plasma-squelette » (fig. 2). L'histoire climatique de la région, connue grâce aux travaux des géologues (SERVANT, 1973), est compatible avec cette interprétation.

Plusieurs couvertures pédologiques étudiées en Afrique de l'Ouest, appartiennent à la catégorie des systèmes « éluviaux-illuviaux » à la fois par leur organisation et par leurs constituants. En Haute-Volta, le système étudié à Diebiga (BOULET, 1974) est presque identique à celui de Garango, mais il est déterminé non plus par la présence d'un inselberg mais par une roche mère particulière : le granite leucocrate à grains très grossiers.

Au Tchad, les toposéquences étudiées par BOCQUIER (1971) apparaissent comme des systèmes éluviaux illuviaux qui ont pratiquement achevé leur transformation. Elle ne présentent plus, en effet, de domaine initial.

Au Cameroun, BRABANT (non publié) décrit des systèmes de transformation très voisins de ceux de Garango et de Diebiga, mais où seul est présent l'horizon illuvial inférieur.

La dégradation des cuirasses ferrugineuses développées sur roches granitiques, décrites par LEPRUN (1979) fait intervenir des transformations analogues, mais où les transferts particuliers sont moins importants par rapport aux mécanismes purement géochimiques (transports et exportation de fer en particulier).

Le dernier exemple qui nous soit connu est celui de la couverture pédologique du bassin versant de Marilia dans l'Etat de Sao Paulo - Brésil (QUEIROS NETO, 1981) qui constitue également un système de transformation où les transferts internes identifiés se font sous forme figu-

rée (argile). La couverture initiale est de type ferrallitique, elle est, à l'aval, transformée en un matériau éluvial sableux dont la base est envahie par un horizon illuvial argileux, le terme intermédiaire étant constitué par un sol à l'horizon B textural. Toutefois, si la transformation de l'aval vers l'amont comme précédemment, elle affecte d'abord la partie supérieure du sol et gagne ensuite la profondeur. L'origine du déséquilibre est attribuée par les auteurs au seul enfoncement relatif du niveau de base, sans faire intervenir de facteurs climatiques.

Pas de transport sous forme figurée

Plasma conservé dans les horizons transformés.

Exemple : les systèmes de transformation sur schistes en Guyane française (E. FRITSCH, 1979 ; BOULET, 1981).

ORGANISATION ET DYNAMIQUE

Les études détaillées effectuées depuis quelques années ont montré que les couvertures pédologiques développées sur schistes en Guyane française s'ordonnent en une séquence génétique schématisée sur la figure 3.

Le stade I correspond à une couverture pédologique épaisse de type ferrallitique, comportant un ensemble supérieur brun, très argileux, poreux, microagrégé, épais de plus de 1 mètre, passant progressivement en profondeur à un ensemble non microagrégé, à porosité visible nettement plus faible, de type tubulaire. Ce deuxième ensemble est subdivisé en un horizon rouge, argileux et un horizon rouge violacé, finement micacé, à teneur en limon croissante vers le bas. A ce stade, la dynamique de l'eau est verticale et profonde et la nappe phréatique fluctue à l'aval. On dit que le sol est à drainage vertical libre.

Au stade II, l'amont est identique à celui du stade I mais on observe un amincissement vers l'aval de l'ensemble supérieur microagrégé jusqu'à un seuil de l'ordre du mètre, au-delà duquel apparaissent des manifestations légères d'hydromorphie au-dessus de l'horizon argileux rouge. Cet horizon acquiert simultanément un caractère sec au toucher, qui correspond à une forte rétention de l'eau due à une porosité très fine. Les études hydriques (HUMBEL, 1978 ; GUEHL, 1981), en accord avec les observations de terrain, montrent que l'apparition de ces caractères est associée à un fort ralentissement du drainage vertical,

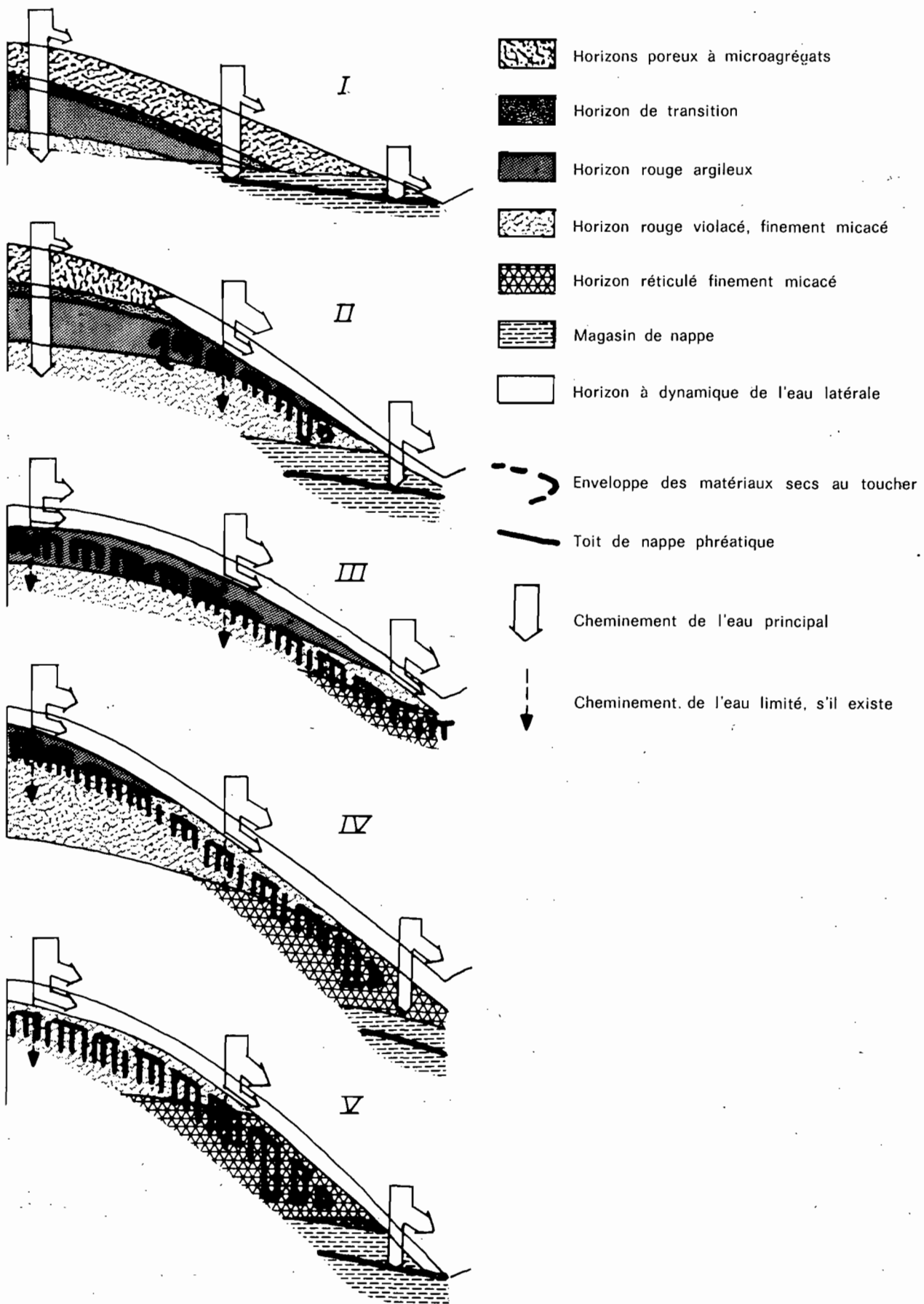


Fig. 3. — Schéma de la séquence génétique développée sur schistes en Guyane française

à l'apparition de nappes perchées fugaces au-dessus de l'horizon argileux rouge et à la différenciation d'un réseau de pores grossiers orientés selon la pente. On montre également que le ruissellement superficiel augmente considérablement par rapport à sa valeur sur sol à drainage vertical libre, le rapport étant de l'ordre de 1 à 10 ; mais l'érosion reste très faible sous forêt primaire (SARRAILH, 1981). La couverture pédologique présente donc à ce stade une dynamique de l'eau complexe : drainage vertical libre à l'amont, drainage vertical bloqué à l'aval. Dans les petits bassins versants (1 ha) tels que ceux étudiés en Guyane, la nappe aval se maintient à proximité de la surface en saison des pluies, tant que la proportion de sols à drainage vertical libre reste importante.

Au stade III l'ensemble supérieur microagrégé n'existe plus, la totalité de la couverture pédologique est à drainage vertical bloqué. Dans les petits bassins versants les matériaux secs au toucher sont présents jusque sous le thalweg. En profondeur, l'horizon rouge violacé micacé passe à un horizon à réseau jaune rouge sur fond jaune, pâlisant vers le bas, également micacé mais plus limoneux.

Au stade IV, l'horizon argileux subsiste seulement à l'amont, les horizons supérieurs à drainage latéral reposent à l'aval sur l'horizon rouge violacé micacé, puis sur l'horizon réticulé. Aux abords du thalweg, les matériaux secs au toucher disparaissent et on décèle la présence d'une nappe phréatique.

Au stade V, l'horizon argileux tend à son tour à disparaître et la nappe affleure dans le thalweg en saison des pluies.

L'étude de ces différents stades montre que la base des horizons à drainage latéral, apparus au stade II, est discordante sur la séquence d'horizons de la couverture pédologique du stade I. Cette base constitue donc un front de transformation et la couverture pédologique du stade I apparaît comme une couverture initiale. Cette troncature implique un départ important de matière. En l'absence de tout indice microscopique de transfert de matières sous forme figurée, on est conduit à admettre que les constituants du sol sont hydrolysés et exportés en solution. Les horizons transformés ont une texture sablo-argileuse à argilo-sableuse, nettement plus grossière que celle des horizons correspondants de la couverture initiale.

DETERMINISME

Lorsqu'on examine la suite des schémas de la figure 3, on constate que les horizons à drainage latéral s'enfoncent dans la couverture initiale, tout en gardant la même épaisseur. La transformation s'accompagne donc d'un abaissement de la surface. Cet abaissement ne correspond pas actuellement à un aplanissement puisque les pentes moyennes augmentent du stade I au stade V. Il s'agit donc au contraire d'un creusement qui traduit un abaissement du niveau de base local. La poursuite de cette évolution ne peut toutefois qu'aboutir ultérieurement à un aplanissement que l'on observe sur d'autres roches mères (granite) qui portent des systèmes du même type.

On constate par ailleurs (BOULET *et al.*, 1979) que cette transformation peut être reliée à des actions tectoniques de faible amplitude. En effet, aux abords des bassins sédimentaires subsidents tels que celui de Berbice au Suriname, les couvertures pédologiques sur socle sont au stade I. Au contraire, dans la partie nord de la Guyane française, située entre le bassin précédent et celui du delta de l'Amazone, et où semble se situer le maximum de soulèvement, cette transformation se généralise, atteignant son maximum dans la région de Cayenne.

Les couvertures pédologiques de Guyane française septentrionale développées sur d'autres roches mères (migmatites, granites) constituent également des systèmes de transformation qui ne diffèrent de ceux sur schistes que par des caractères secondaires.

Squelette maintenu dans les horizons transformés

Exemple : transition « sol ferrallitique-podzol » (KLINGE, 1965 ; TURENNE, 1975 ; BOULET *et al.*, 1982 ; LUCAS *et al.*, 1983).

Sur les formations détritiques continentales en Guyane française ou encore au Brésil, dans la région de Manaus par exemple (climat équatorial, pluviosité de l'ordre de 2 mètres), on observe des couvertures pédologiques constituées de sols ferrallitiques et de podzols de plusieurs mètres d'épaisseur. De nombreuses coupes à travers la transition « sol ferrallitique-podzol » montrent des organisations très voisines, qui sont schématisées sur la figure 4.

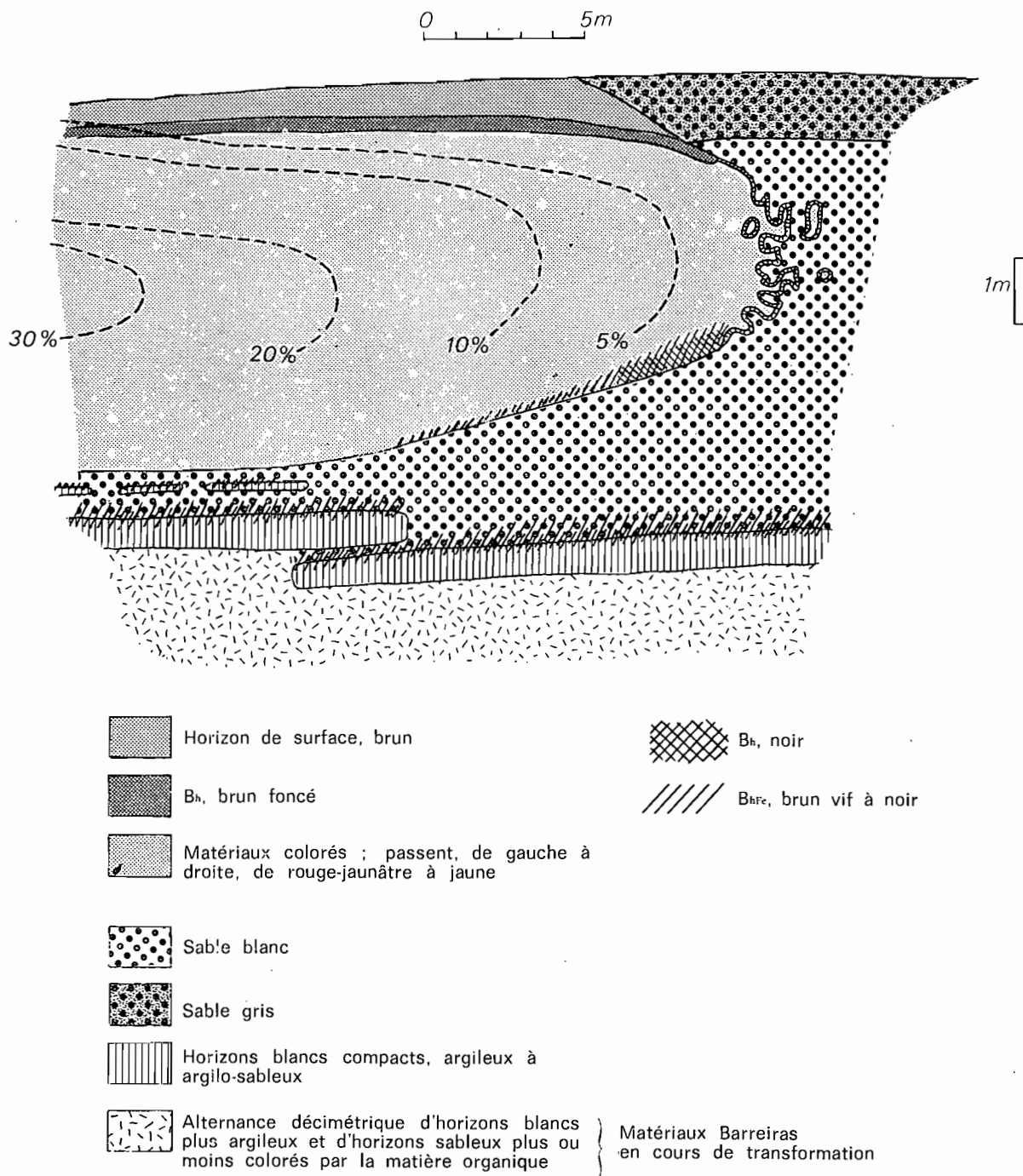
Le pôle ferrallitique, à gauche de la figure, présente un profil à ensemble supérieur brun, sablo-argileux à argilo-sableux, microagrégé, po-

reux, passant progressivement vers 40-50 centimètres à des horizons rouges à jaune rougeâtre, argilo-sableux à argileux, microagrégé, poreux, épais de plusieurs mètres.

En se déplaçant vers le podzol, on observe :

— Une diminution très progressive du taux

d'argile granulométrique du profil (cf. courbes isovaleurs de l'argile, fig. 4) avec éclaircissement progressif des matériaux qui restent néanmoins colorés. Cette variation du taux d'argile et de la couleur se fait très progressivement sur une distance allant de quelques dizaines de mètres à plus de 100 mètres.



Couleurs : nomenclature Munsell

Fig. 4. — Représentation schématique de la transition sols ferrallitiques-podzols sur formation Barreiras

— Un blanchissement abrupt des horizons quand le taux d'argile granulométrique descend sous un seuil de 2 à 3 %. Le passage sable coloré-sable blanc se fait sur une épaisseur de 1-2 cm marquée par une accumulation organique brun-noirâtre (Bh). La géométrie de cette transition est très contournée, avec des reliques de sable coloré dans le sable blanc. Son enveloppe est en forme de langue, les sables blancs apparaissant en coin au sommet et à la base des horizons colorés.

— L'apparition plus ou moins précoce d'horizons Bh ou Bh Fe à la partie supérieure et à la base des horizons colorés (Fig. 4). Ces horizons s'incurvent en suivant la géométrie de la transition lors du passage au sable blanc, puis disparaissent.

— La présence, à la base des sables blancs, d'un nouvel horizon Bh Fe, sableux, épais de 50 à 100 cm. Celui-ci repose sur un horizon argileux blanc, compact, à porosité visible très faible, gardant la trace d'une stratification sédimentaire. Des observations microscopiques montrent l'existence de kaolinite néoformée dans cet horizon compact. Des reliques de cet horizon compact dans le Bh Fe et dans le sable blanc montrent que ces derniers se développent à ses dépens.

— La présence d'une nappe perchée temporairement sur l'horizon blanc compact. Cette nappe concourt à la destruction par le bas des matériaux colorés, à la destruction par le haut de l'horizon blanc compact, à la formation du Bh Fe de profondeur.

La géométrie de la transition exclut l'éventualité d'une variation d'origine sédimentaire et montre qu'il s'agit d'un front de transformation progressant latéralement aux dépens de la couverture ferrallitique. Cette transformation aboutit à la formation de podzols. Il y a appauvrissement progressif des horizons ferrallitiques par destruction du plasma et dissolution d'une partie du squelette quartzeux, comme le montre l'observation microscopique des quartz résiduels, extrêmement corrodés. Les produits exportés en solution participent probablement, en profondeur, à une néoformation de kaolinine. Si la nappe perchée qui apparaît sur les horizons compacts participe à la progression latérale de la transformation, les causes du déclenchement initial du phénomène restent cependant encore hypothétiques.

La cartographie des sols ferrallitiques et des podzols développés sur formation détritique continentales en Guyane française, montre qu'il existe tous les stades de transformation entre une unité de modelé à couverture ferrallitique (Fig.

5 A) et une unité de modelé entièrement podzolisée (Fig. 5 E). La podzolisation débute au centre des plateaux ferrallitiques (Fig. 5 B) et progresse vers les bords, jusqu'à ne plus laisser que quelques reliques latérales de sols colorés (Fig. 5 E). La perte de matière consécutive à la transformation entraîne un avachissement important du modelé par vidage géochimique. Cet abaissement va jusqu'à provoquer l'affleurement de la nappe hydrostatique au cœur des plateaux, créant des axes de drainage non incisés, marécageux, mal hiérarchisés, dépourvus d'alluvions (Fig. 5 D).

Ce type de transformation aboutit donc au remplacement des plateaux ferrallitiques, dont les sols sont argileux à argilo-sableux, par des couvertures podzoliques présentant un modelé aplani et caractérisées par la très large dominance des sables quartzeux.

Systèmes apparentés

En Guyane française, sur les formations sédimentaires marines « Coswine » (sables fins argileux) existent aussi des systèmes de transformation de couverture ferrallitique en podzols (TURPIN, 1975 ; BOULET *et al.*, 1982). La dynamique de cette transformation à l'échelle des unités de modelé, est voisine de celle qui vient d'être décrite : podzolisation débutant au centre des unités de relief et progressant de façon centrifuge. L'échelle de ces systèmes est cependant beaucoup plus petite, de l'ordre de la centaine de mètres au lieu du kilomètre. De plus, ces transformations se font sur des épaisseurs moindres, de 2 à 4 mètres au lieu de plus de 10 mètres.

INTERPRETATION GENERALE

Les causes connues des transformations

Si les transformations qui interviennent au sein des systèmes présentés ont été mises en évidence et analysées de façon rigoureuse, les causes des déséquilibres internes qui ont initié ces transformations restent du domaine des hypothèses. Les conclusions des divers auteurs que l'on a citées ou évoquées permettent toutefois de distinguer deux grands types de causes possibles :

— Le premier type fait intervenir les variations climatiques diachroniques. Celles-ci sont cependant connues avec d'autant moins de détail que croît l'âge de la période considérée et il est souvent difficile de relier l'échelle de temps de l'évo-

lution des systèmes de transformation à celle de l'évolution des climats.

— Le second type de causes fait intervenir des variations régionales du niveau de base, d'origine eustatique ou tectonique ; en Guyane française (système de transformation sur schistes), ce sont probablement les causes tectoniques (épeirogenèse) qui interviennent.

Cependant, l'universalité des variations climatiques et la fréquence des variations locales du niveau de base pourraient laisser supposer qu'un grand nombre de couvertures pédologiques sont en déséquilibre, alors que peu de systèmes de transformation sont actuellement recensés. Il convient alors de remarquer qu'avant les années 1970, les systèmes de transformation étaient in-

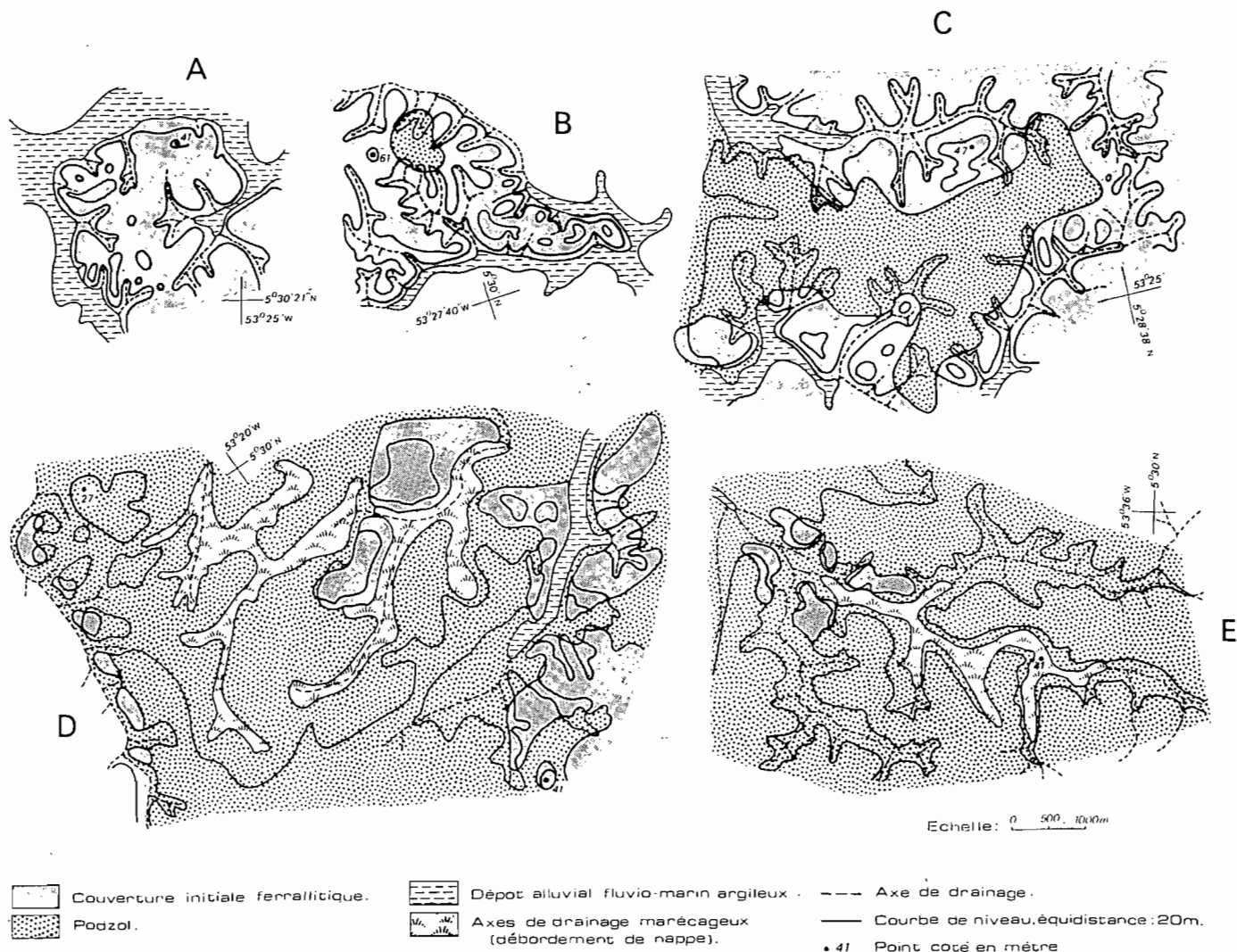


Fig. 5. — Exemples d'unités de modelé à divers stades d'évolution du système de transformation sols ferrallitiques - podzols en Guyane française (région d'Oronato) sur série détritique de base.

connus (1) et qu'ils ont été découverts dans des régions déjà concernées par des études pédologiques antérieures.

L'étude détaillée de l'organisation bi, voire tri-

dimensionnelle, des couvertures pédologiques, à l'échelle de l'unité élémentaire de modelé, a été nécessaire à leur mise en évidence. Il est donc probable que la multiplication de ce type d'étude va enrichir l'inventaire des systèmes de transformation, même dans les régions pédologiquement les mieux connues. Un des exemples les plus récents est celui de Marilia, au Brésil, où la juxtaposition « sol ferrallitique-sil à B textural-sol sableux à hydromorphie de profondeur », était

(1) Les transformations de sols bruns en podzols, par exemple, n'ont été considérées qu'en tant que chronoséquences (AMERIJCX, 1960). Il est vraisemblable qu'il s'agit de systèmes de transformation, mais les études qui replacent spatialement le phénomène dans la couverture pédologique restent à faire.

auparavant attribuée à des différences de matériau originel.

D'autre part, l'âge des couvertures pédologiques conditionne l'existence d'organisations héritées susceptibles d'être en déséquilibre avec les conditions pédoclimatiques actuelles.

Les effets des transformations

Dans la plupart des systèmes de transformation identifiés, la couverture pédologique initiale présente un profil poral et une association « plasma-squelette » assurant à la fois une dynamique de l'eau verticale et profonde et la constitution de réserves hydriques. Ces conditions sont favorables aussi bien à la végétation naturelle qu'à l'utilisation agricole du sol. De ce point de vue, les transformations observées aboutissent toujours à une modification des propriétés du sol, soit par perte de macroporosité, acquisition d'une dynamique de l'eau superficielle et latérale et amincissement du sol utile, soit par perte totale du plasma qui ne laisse sur place qu'un sol de sable quartzueux plus ou moins pur.

Bien que la vitesse d'évolution naturelle des systèmes de transformation ne soit pas à l'échelle humaine, les couvertures pédologiques en déséquilibre constituent cependant des milieux particulièrement fragiles que les actions anthropiques sont susceptibles de dégrader très rapidement si l'on n'adapte pas soigneusement les techniques au milieu. Dans certains cas, cette dégradation correspond aux premiers stades de la transformation dans les conditions naturelles (Casamance). Dans d'autres cas interviennent de nouveaux mécanismes tels que l'érosion et/ou la compaction.

Conséquences sur l'évolution des paysages

Les relations « morphogenèse-pédogenèse » pré-occupent géomorphologues et pédologues depuis longtemps. J. TRICART et P. MICHEL en particulier en ont analysé les différentes facettes il y a 20 ans (1965). La connaissance des systèmes de transformation est toutefois susceptible d'enrichir la connaissance de ces relations. En effet, la pédologie a, jusqu'alors, été considérée comme « subordonnée » à la géomorphologie, comme « la géomorphologie est subordonnée à la géologie structurale » (TRICART et MICHEL, 1965): « L'évolution géomorphologique fournit à la formation et à l'évolution du sol un cadre » (TRICART et MI-

CHEL, 1965). De même si la pédogenèse prépare les matériaux sur lesquels agiront les agents morphogénétiques, elle n'est pas considérée elle-même comme un agent morphogénétique direct. Or, nous constatons que les redistributions internes de matière qui s'effectuent dans les systèmes de transformation sont susceptibles de contribuer à l'évolution du modelé, voire dans certains cas de la commander. Dans les systèmes éluviaux-illuviaux d'Afrique de l'Ouest et dans les systèmes de transformation sur socle en Guyane française, elles constituent actuellement l'un des principaux agents d'évolution du modelé (MILLOT, 1980). Dans certains cas, la mise en déséquilibre, puis la transformation centrifuge de la couverture pédologique détermine la transformation d'un plateau en interfluves surbaissés. Cette transformation passe par des modèles de transition, dont le centre est affaîsé par vidange géochimique tandis que subsistent des reliques périphériques du plateau et de la couverture initiale (Fig. 5). Tel est le cas de l'évolution des modelés sur série détritique de base et sur barres pré littorales en Guyane. En Casamance, on observe, avec d'autres mécanismes, une différenciation analogue du modelé. Ainsi trouve-t-on, dans les régions aussi différentes, des formes du relief analogues déterminées par la pédogenèse.

CONCLUSIONS

Des analyses spatiales faites à l'échelle des interfluves élémentaires ont mis en évidence en diverses régions l'existence de systèmes de transformations dans lesquels une couverture initiale se transforme en une autre souvent fort différente. Cette transformation est discordante sur les horizons de la couverture initiale et progresse latéralement.

Le nombre de ces systèmes reste actuellement faible, mais on pressent que leur inventaire n'en est qu'à son début, ne serait-ce que parce que les méthodes d'analyse structurale nécessaires à leur identification et à leur étude sur le terrain sont encore peu utilisées.

La connaissance des systèmes de transformation nous informe sur les relations génétiques et fonctionnelles qui existent entre les différents volumes constituant la couverture pédologique. Elle participe donc à la connaissance fondamentale du sol.

Elle révèle l'existence d'entités pédologiques à l'échelle de l'interfluve qui peuvent être utili-

sées directement dans la cartographie. Une telle cartographie prend en compte, quelle que soit son échelle, l'ensemble des connaissances acquises sur chaque entité.

Enfin, la connaissance des systèmes de trans-

formation apporte aux disciplines dont l'objet d'étude dépend du sol (agronomie, botanique, hydrologie,...) à la fois une compréhension des couvertures pédologiques correspondantes et une structure à laquelle référer leurs observations.

BIBLIOGRAPHIE

- AMERIJC J.C. - 1960 - La pédogenèse en Flandre sablonneuse. Une chronobioséquence sur matériau sableux. *Pédologie*, Gand X, 1, p. 124-190.
- BALDENSPERGER J., STAIMESSE J.P., TOBIAS C. - 1968 - Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/200 000. Moyenne Casamance. Centre ORSTOM de Dakar-Hann, Sénégal.
- BOCOUIER G. - 1971 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Sci. Strasbourg et Mém. ORSTOM n° 62, 350 p.
- BOULET R. - 1974 - Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Thèse Sci. Strasbourg et mém. ORSTOM, n° 85, 272 p.
- BOULET R. - 1981 - Etude pédologique des bassins versants ECEREX : Bilan de la cartographie. Bull. liais. Groupe travail ECEREX, n° 4, pp. 4-22.
- BOULET R., HUMBEL F.-X. et LUCAS Y., - 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. II - Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. Cah. ORSTOM. sér. Pédol., XIX, 4 : 323-339.
- BUSHNELL T.M. - 1942 - Some aspects of the soil catena concept. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 7, pp. 466-476.
- CHAUVEL A. - 1976 - Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse Sci. Strasbourg et Travaux et Documents ORSTOM n° 62, 532 p.
- CHAUVEL A. et PEDRO G. - 1978 - Sur l'importance de l'extrême dessiccation des sols (ultra-dessiccation) dans l'évolution pédologique des zones tropicales à saisons contrastées. C.R. Acad. Sc. Paris.
- FRITSCH E. - 1979 - Etude des organisations pédologiques et représentation cartographique détaillée de quatre bassins versants expérimentaux sur schistes Bonidoro de Guyane française. Rapports ORSTOM.
- GREENE H. - 1945 - Classification and use of tropical soil. *Soil. Sci. Soc. Ann. Proc.* 10. p. 392-396.
- GUEHL J.M. - (à paraître) - Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. A paraître in *Annales forestières de l'INRA*.
- HUMBEL F.-X. - 1978 - Caractérisation par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle. *Sci. du Sol.* n° 2, pp. 83-94.
- KLINGE H. - 1965 - Podzols soils in the Amazon Basin. *J. Soil. Sci.*, p. 96-103.
- LEPRUN J.C. - 1919 - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformation, dégradation. Thèse Sci. Strasbourg, 222 p.
- LUCAS Y., CHAUVEL A., BOULET R., RANZANI G., SCATOLINI F., - 1983 - Transição « latossolo-podzol » sobre a formação Barreiras na região de Manaus. Comm. XIX Congr. Brasileiro de Ciencia do Solo - Curitiba. Brasil.
- MILLOT G. - 1980 - Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques. Mem.-4 sér. soc. géol. de France, n° 10, p. 295-305.
- MILNE G. - 1934 - Some suggested units of classification and mapping particularly for East African Soils. *Soil Res.* 4. 2. p. 183-198.
- NAHON D. - 1976 - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs, géochimie, structures, relais et co-existence. Thèse Sci. Marseille et Sciences Géologiques. Mémoire n° 44, 232 p.
- OUEIROS NETO J.P., CASTRO S.S., FERNANDES BARRO O.N., MAN FREDINI S., PELLERIN S., RUELLAN A., TOLEDO S.S. - 1981 - Un estudo de dinamica do solos : formação e transformação de perfis com horizonte B textural. Comm. XVIII Congresso Brasileiro de Ciencia de Solo. Salvador - Brasil.
- RAUNET M. - 1978 - Reconnaissance géographique et morphopédologique dans la Rift Valley éthiopienne. *Agronomie Tropicale*, 23, 1-2, 1-43.
- RAUNET M. - 1979 - Importance et interactions des processus géochimiques, hydrologiques et biologiques (termite) sur les surfaces d'aplanissement tropicales granito-gneissiques. Exemple au Kenya Occidental. *Agronomie Tropicale* 24, 1, 39-53.
- SARRAILH J.-M. - 1981 - Parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et de l'érosion. Analyse de résultats obtenus durant les deux premières campagnes de mesure. Bull. liais. Groupe de travail ECEREX n° 4, pp. 45-51.
- SERVANT M. - 1973 - Séquences continentales et variations climatiques : évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Thèse Sci. Paris, 348 p.
- TRICART J., MICHEL P. - 1965 - Morphogenèse et pédogenèse. I - Approche méthodologique : géomorphologie et pédologie. *Sci. du Sol.*, Vol. I, pp. 69-85
- TURENNE J.-F. - 1965 - Mode d'humidification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse Sci. Nancy et mém. ORSTOM, n° 84, 173 p.

Association Française pour l'Etude du Sol

LIVRE JUBILAIRE DU CINQUANTENAIRE

1934



1984

PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS

- DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
- DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE,
- DE L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (O.R.S.T.O.M.), et
- DE LA MISSION INTERMINISTERIELLE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE (MIDIST).