

L'analyse structurale de la couverture pédologique

A. RUELLAN⁽¹⁾M. DOSSO⁽²⁾E. FRITSCH⁽³⁾

RESUME

Les constituants de la couverture pédologique sont organisés entre eux, formant ainsi des structures qui sont spécifiques du milieu pédologique. Ces structures résultent de l'histoire et du fonctionnement actuel de la couverture pédologique.

Les structures existent à divers niveaux, les quatre principaux types étant : les organisations élémentaires, les assemblages, les horizons, les systèmes pédologiques. La démarche d'analyse structurale tridimensionnelle de la couverture pédologique consiste à :

— dans un premier temps, découvrir et décrire ce que sont les structures, aux différentes échelles ;

— dans un deuxième temps, rechercher la quatrième dimension temporelle : interprétation dynamique des relations géométriques qui existent entre les structures (histoire de la mise en place des structures ; fronts de transformation actuelle des structures).

L'analyse structurale est une démarche de recherche scientifique, une démarche de découverte de la réalité pédologique. Mais c'est aussi un outil qui, une fois réalisée l'étape d'étude très détaillée à l'échelle d'une unité de relief, facilite la découverte et la représentation graphique, aux échelles plus petites, des structures et des fonctionnements de la couverture pédologique.

Un exemple d'analyse structurale est présenté : l'étude, dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, des relations entre sols ferrallitiques rouges et sols ferrugineux, Côte d'Ivoire.

MOTS CLES : Analyse structurale - Morphologie - Horizon - Système pédologique - Pédogénèse - Cartographie - Sols ferrallitiques, ferrugineux - Côte d'Ivoire.

THE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE SOIL COVER

The constituents of the soil cover are organized between them, thus forming structures which are specific of the pedological medium. These structures result from the history and from the actual dynamic of the soil cover.

The structures exist at different levels, the four main types being : the elementary organizations, the assemblages, the horizons, the pedological systems. The three-dimensional structural analysis approach of the soil cover is :

— first, discover and describe what are, at the different scales, the structures ;

— secondly, find the fourth temporal dimension : it is the dynamic interpretation of the geometrical relations that exist between the structures (history of the formation of the structure ; actual fronts of transformation of the structure).

(1) CNEARC, av. du Val de Montferrand, B.P. 5098, 45033 Montpellier Cédex 1.

(2) Sciences Physiques de la Terre, Université de Paris VII, 2, place Jussieu, 75230 Paris Cédex 05.

(3) CPB-CNRS, 17, rue Notre-Dame des Pauvres, B.P. 5, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cédex.

The structural analysis is a scientific research approach, an approach for the discover of the pedological reality. But it is also a tool that facilitate, after the realization of a detailed study at the scale of a relief unity, the discover and the graphic representation, at smaller scales, of the structures and of the dynamics of the soil cover.

An exemple of structural analysis is presented : the study, in the North-West of Ivory Cost, of the relations between red ferrallitic soils and yellow ferruginous soils.

KEY WORDS : Structural analysis - Structure - Morphology - Horizon - Pedological system - Soil evolution - Soils cartography - Ferrallitic soils - Ferruginous soils - Ivory Cost.

Ce qui, en pédologie, est appelé « le sol », est une entité naturelle à trois dimensions spatiales, et d'aspect continu ; c'est la couverture pédologique, partie supérieure de la lithosphère transformée par la présence et les actions de l'atmosphère et de la biosphère.

I. LES STRUCTURES DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Pour connaître et pour comprendre la couverture pédologique, trois aspects doivent être découverts et étudiés : les constituants, les structures, l'évolution.

Nous n'aborderons pas ici l'étude des constituants : la couverture pédologique est faite de constituants minéraux et organiques, qui peuvent être solides, liquides ou gazeux. L'identité, la morphologie, la dynamique de ces constituants doivent être reconnues.

A) LES QUATRE TYPES DE STRUCTURES

Les constituants de la couverture pédologique, principalement les constituants solides et liquides, sont organisés les uns par rapport aux autres :

— ils donnent ainsi naissance à des structures qui sont spécifiques du milieu pédologique ;

— ces structures sont l'aspect morphologique de la couverture pédologique, équivalent à l'anatomie d'un être vivant.

Ces structures résultent de relations qui s'établissent entre les constituants. Par ailleurs, il existe des liens entre, d'une part les structures, d'autre part les propriétés physico-chimiques, les modes de fonctionnement, les dynamiques, de la couverture pédologique.

La couverture pédologique est structurée à différents niveaux : depuis l'échelle de l'organisation des particules, jusqu'à celle de l'unité de paysage. Quatre types de structures, correspondant à quatre échelles différentes d'organisation de la couverture pédologique, sont tout particulièrement importants à décrire, à mesurer et à comprendre dans le but d'une meilleure connaissance et d'une meilleure utilisation des sols.

1. Les organisations élémentaires

Ce sont des volumes pédologiques qui rassemblent les constituants ; ces organisations sont partiellement visibles à l'œil nu, partiellement à l'aide de microscopes :

• sous les microscopes (optiques et électroniques) les organisations élémentaires se décrivent en termes de constituants et de relations entre les constituants ;

- sur le terrain, dans les fosses, les principaux types d'organisations élémentaires que l'on peut reconnaître et décrire, sont : des agrégats, des vides, des concentrations de constituants (revêtements, nodules,...), des couleurs, des traces d'activités biologiques ;

- il peut y avoir au sein par exemple d'un agrégat ou d'un nodule, plusieurs niveaux emboîtés d'organisations élémentaires.

Des déterminations analytiques complètent la description et la caractérisation des organisations élémentaires.

2. Les assemblages

Ce sont des volumes pédologiques que l'on caractérise, sur le terrain et sous les microscopes, par la présence associée d'un certain nombre d'organisations élémentaires. Un assemblage se décrit en terme de types de constituants, d'agrégats, de vides, de concentrations, de couleurs, de caractères biologiques : on décrit ces organisations élémentaires et les relations qui existent entre elles. Des déterminations analytiques complètent la caractérisation des assemblages (exemples d'assemblages : andique, vertique, calcique...).

3. Les horizons

Ce sont des volumes pédologiques, plus ou moins parallèles à la surface du terrain. Chaque horizon se décrit en terme d'un ou plusieurs types d'assemblages et de leurs relations. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres : le plus souvent, elle est de l'ordre de 1 à plusieurs décimètres. Les limites, supérieure et inférieure, d'un horizon sont plus ou moins nettes, plus ou moins progressives ou brutales. Latéralement, l'extension d'un horizon est très variable : du mètre... jusqu'à plusieurs kilomètres ; il n'est cependant jamais infini : latéralement, il disparaît ou il se transforme en un autre horizon.

4. Les systèmes pédologiques

Ce sont des volumes pédologiques, au sein desquels des horizons sont organisés entre eux, verticalement et latéralement, à l'échelle de l'unité de relief. Un système pédologique se décrit donc en termes d'horizons et de relations entre horizons, c'est-à-dire : ce que sont ces horizons, comment ils se superposent verticalement et se succèdent latéralement, comment ils sont séparés les uns des autres (nature des limites qui les séparent, des variations morphologiques qui marquent le passage d'un horizon à l'autre, donc d'un ou plusieurs types d'assemblages à d'autres types d'assemblages). Dans certains systèmes pédologiques, les variations verticales et latérales sont plus celles des assemblages qui se transforment et se succèdent que celles d'horizons qui se succèdent. La définition morphologique du système pédologique doit trouver sa confirmation par des critères géochimiques et minéralogiques ; ainsi, au terme d'une étude complète, un système pédologique est défini d'après des critères qui sont, à la fois, géochimiques, minéralogiques et structuraux.

B) L'ÉVOLUTION DES STRUCTURES

La couverture pédologique est en perpétuelle évolution :

- il y a évolution, transformations des constituants, des structures, des propriétés chimiques, physiques, mécaniques ;

- il y a, au sein de la couverture pédologique, des transferts, permanents ou intermittents, de matières solides, liquides, gazeuses ;

- au total, à tous les niveaux d'organisations, il y a, au sein de la couverture pédologique, des fronts de transformation, morphologiquement visibles, fronts

au niveau desquels les constituants et les structures, ainsi que les propriétés et les fonctionnements, se remplacent et se succèdent.

Cette évolution permanente de la couverture pédologique lui confère sa quatrième dimension qui est temporelle.

Les structures de la couverture pédologique traduisent, à la fois, l'histoire et l'actualité dynamique de cette couverture : l'évolution passée et l'évolution actuelle des sols sont partiellement exprimées par leur morphologie actuelle. Ceci veut dire que l'étude des structures, de leurs relations, des limites qui les séparent, toutes ces études permettent de reconstituer l'histoire de la couverture pédologique, c'est-à-dire la chronologie des mises en place des structures et des fonctionnements ; elles permettent également de déterminer ce que sont les évolutions actuelles : où et comment se font les transformations structurales donc les transformations de fonctionnement.

De ce fait, la connaissance des structures, depuis l'organisation élémentaire jusqu'au système pédologique, peut permettre une certaine prévision : celle de l'évolution des sols, en fonction des modalités d'utilisation et d'aménagement.

II. LA DÉMARCHE D'ANALYSE STRUCTURALE TRIDIMENSIONNELLE DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

L'analyse structurale tridimensionnelle a pour but de découvrir, d'étudier et d'interpréter les structures de la couverture pédologique. Cette analyse se déroule en deux étapes principales(*) :

1. Première étape : Découverte et description de ce que sont, aux différentes échelles, les structures de la couverture pédologique.

a) Il s'agit, à toutes les échelles, à l'aide d'observations et de mesures très détaillées :

- de faire l'inventaire des structures ;
- de mettre en évidence les relations géométriques qui existent entre les structures ;
- d'étudier les transitions entre structures, les limites qui les séparent : l'analyse structurale privilégie l'étude des transitions, des limites (entre organisations élémentaires, entre assemblages, entre horizons, entre systèmes pédologiques), car c'est aux limites que l'on peut comprendre les relations.

b) Le travail est toujours entamé dans le cadre d'une unité élémentaire de modelé (un bassin versant élémentaire, par exemple), choisi en fonction de la représentativité du milieu que l'on veut étudier. Le choix de cette unité élémentaire de paysage ne peut donc se faire qu'en fonction d'une bonne connaissance préalable du milieu, et en particulier d'une bonne connaissance préalable des sols. Ceci est important à souligner : les étapes préalables à l'analyse structurale d'une région pédologiquement inconnue ou peu connue, sont :

- l'identification des principaux types de paysages et des principaux types d'écosystèmes : ceci se fait à l'aide des documents cartographiques déjà existants (cartes topographiques, cartes géologiques, etc.) ;
- la reconnaissance rapide de la couverture pédologique de chaque type de paysage : il s'agit d'identifier l'essentiel, mais sans cartographier ;

(*) Voir la bibliographie en fin d'article, et en particulier les travaux de René BOULET principal responsable de la mise au point de l'analyse structurale tridimensionnelle de la couverture pédologique.

- le choix, dans chaque type de paysage, d'une unité de modèle représentative, unité que l'on va alors étudier très en détail.

c) Pour réaliser, sur le terrain, l'analyse structurale détaillée d'une unité élémentaire de paysage, dont la superficie est de l'ordre de quelques hectares, voire quelques dizaines d'hectares, on procède en deux temps :

- premier temps : étude de fosses qui sont ouvertes le long de toposéquences placées en fonction de la topographie (dans le cas d'un bassin versant, par exemple, les toposéquences sont perpendiculaires aux courbes de niveaux, radiales au talweg) ; le long des toposéquences, les fosses sont placées en fonction des découvertes qui sont faites progressivement, la profondeur des fosses étant fonction soit de l'épaisseur de la couverture pédologique, soit d'une observation spécifique que l'on cherche à faire ; la localisation des fosses doit permettre de voir, de décrire, toutes les structures présentes le long de la toposéquence et toutes les transitions et limites qui associent et séparent ces structures ; quand cela est possible, on commence l'étude des toposéquences par une reconnaissance à la tarière : cela permet de placer les premières fosses avec plus de précision ;

- deuxième temps : on travaille entre les toposéquences ; le but est alors de découvrir la troisième dimension spatiale, et ainsi de délimiter l'extension latérale de chaque type de structure mise en évidence dans les toposéquences ; ce travail est fait, principalement, à l'aide de sondages à la tarière et à l'aide de fosses plus petites.

Il s'agit donc d'un investissement important que l'on ne peut pas répéter bien souvent. Mais l'objectif est justement de ne pas répéter, mais bien ou contraire de découvrir, grâce à quelques études détaillées de ce type, quels sont les critères de généralisation à toute une région.

d) Les études morphologiques réalisées sur le terrain sont poursuivies sous les microscopes (optiques et électroniques) : description des constituants et des relations entre les constituants, des organisations élémentaires et des assemblages, des relations qui existent entre ces organisations et assemblages.

e) On complète les études morphologiques et géométriques par des déterminations minéralogiques, chimiques, physiques, etc. faites sur les échantillons choisis en fonction des structures observées.

f) Enfin, une fois connue l'organisation structurale de plusieurs unités élémentaires de paysage, on retourne vers des échelles plus petites pour étudier les relations structurales qui existent entre les systèmes pédologiques mis en évidence à l'échelle des unités élémentaires.

2. Deuxième étape : Recherche de la quatrième dimension temporelle.

Cette recherche peut s'appuyer sur des mesures de dynamique actuelle. Elle doit cependant toujours commencer par une interprétation dynamique des relations géométriques qui existent entre les structures. Le raisonnement qui permet à partir d'une observation morphologique d'objets, de passer à l'interprétation dynamique de leurs relations, est d'emploi courant en géologie, quelle que soit l'échelle d'observation. Ce raisonnement, utilisé couramment en pédologie à l'échelle de l'observation des lames minces, devrait voir son utilisation à l'échelle de toposéquences puis à celle des documents cartographiques, se développer dans les années à venir. C'est à partir de cette interprétation dynamique des relations géométriques que l'on peut mettre en évidence :

- d'une part, l'histoire de la mise en place des structures, c'est-à-dire la genèse de la couverture pédologique telle qu'on la voit aujourd'hui ;

- d'autre part, les fronts de transformation actuelle des structures, c'est-à-dire l'évolution actuelle de la couverture pédologique : où et comment se fait cette évolution.

III. L'ORIGINALITÉ DE LA DÉMARCHE ET DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE STRUCTURALE

L'analyse structurale tridimensionnelle est donc une approche morphogénétique de la couverture pédologique.

Son originalité repose, principalement, sur des objectifs et sur des démarches qui sont spécifiques.

1) Il s'agit de privilégier l'observation et la mesure des structures.

2) Il s'agit de travailler aux échelles qui sont celles des structures existantes. C'est-à-dire qu'il s'agit de réaliser, à chaque fois que cela est nécessaire, les études géométriques détaillées qui permettent de connaître et de comprendre les structures d'une part, les relations qui existent entre les structures d'autre part : toute modélisation, toute hypothèse concernant des géométries que l'on peut en fait observer, sont à éviter.

3) Ceci veut dire qu'il s'agit de prendre le temps de travailler aux limites. L'objectif est de rechercher et d'observer les limites qui existent entre organisations élémentaires, entre assemblages, entre horizons, entre systèmes pédologiques, sachant que certaines limites sont très progressives, en particulier dans la partie supérieure des couvertures pédologiques.

4) Il s'agit également de rechercher et de délimiter les unités structurales réelles. A l'échelle de l'unité de relief, cela veut dire que l'on cherche à délimiter des assemblages, des horizons, des systèmes pédologiques. Le profil pédologique reste, évidemment, un outil précieux d'observation, mais ce n'est pas une unité structurale.

5) Enfin, il s'agit de comprendre, d'interpréter, les relations génétiques qui associent les structures, dans l'espace et dans le temps.

Au terme d'une analyse structurale, on dispose d'un grand nombre de critères pour la reconnaissance et pour la cartographie, à différentes échelles, des structures de la couverture pédologique de la région considérée :

- on connaît les ensembles structuraux et on connaît les principales étapes de leur différenciation ;

- on connaît les limites qui séparent ces ensembles structuraux : ces limites peuvent être des fronts de transformation dont on connaît le sens de déplacement.

On peut donc réaliser une représentation cartographique explicite des unités de modelé étudiées : en représentant sur les cartes, à la fois les structures, les limites, statistiques ou dynamiques, qui séparent ces structures, mais aussi, s'il y a lieu, les étapes de développement de ces structures : développement des assemblages, des horizons, des ensembles d'horizons.

L'analyse structurale est d'abord une démarche de recherche scientifique, une démarche de découverte de la réalité pédologique. Mise en pratique, elle devient un outil qui, une fois réalisée l'étape d'étude très détaillée au niveau d'une unité de modelé, facilite la découverte et la représentation graphique, aux échelles plus petites, des structures et des fonctionnements de la couverture pédologique.

La démarche d'analyse structurale, permettant une compréhension détaillée et globale de la couverture pédologique, aide ainsi à construire le cadre de référence de toutes les études et de toutes les analyses partielles à venir.

Réaliser quelques études très détaillées, pour pouvoir ensuite travailler, à des échelles plus petites ou plus grandes, d'une manière qui soit à la fois plus exacte et plus rapide : tel est l'objectif opérationnel de l'analyse structurale.

IV. UN EXEMPLE D'ANALYSE STRUCTURALE :

Étude, dans le nord-ouest de la Côte-d'Ivoire, des relations entre sols ferrallitiques rouges et sols ferrugineux jaunes

Les étapes de l'analyse structurale, ses résultats et ses applications, ont fait l'objet de nombreux travaux : AL SIDDIK (1983), BOULET et al. (1982, I, II, III ; 1984, 1987), DOSSO (1986), DOSSO et al. (1986), FRITSCH (1977, 1979, 1984, 1986), FRITSCH et al. (1986), HUMBEL (1984), LUCAS et al. (1984, 1986), RUELLAN (1984, 1986), RUELLAN et al. (1985), SEYLER (1986). Les travaux de FRITSCH (1986) permettent d'illustrer ce que l'on peut attendre d'une analyse structurale tridimensionnelle de la couverture pédologique, sans entrer dans le détail de la démarche suivie, des résultats obtenus et des raisonnements effectués.

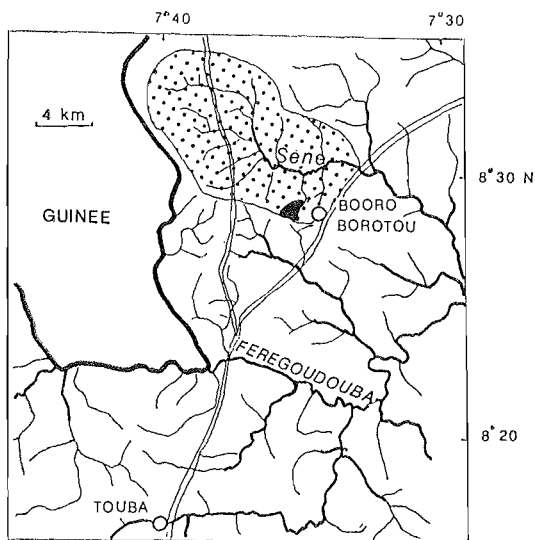


Figure 1 : Situation du bassin versant de Booro-Borotou dans la partie amont du bassin versant de la Séné.

Location of the BOORO-BOROTOU watershed, in the upper part of the SENE watershed.

A) SITUATION

Au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, à proximité de la Guinée, le climat tropical subsoudanais, dit de « transition », présente une seule saison des pluies (1350 mm) et des températures moyennes élevées toute l'année (supérieures à 24°C). La végétation est une savane pré-forestière : plus au sud, les grandes forêts équatoriales ne sont pas loin ; plus au nord, les savanes se développent. La roche-mère dominante est le gneiss migmatitique à hypersthène.

Pédologiquement cette région est une zone de transition entre :

- des sols ferrallitiques rouges qui dominent dans le sud plus humide du pays et
- des sols ferrugineux jaunes, qui dominent dans le nord plus sec.

Ces deux types de sols coexistent dans un même bassin versant élémentaire.

Dans cette région, on a choisi le petit bassin versant élémentaire (136 hectares) de Booro-Borotou (fig. 1). L'étude fait partie du programme scientifique « Hyperbav » (hydro-pédologie de recherche sur bassin versant).

La géologie du bassin est présentée figure 2. Sa géomorphologie (fig. 3) est simple :

- Un marigot, axe central de drainage, orienté NO-SE.
- En situation amont, des plateaux cuirassés, d'extension limitée, sont démantelés à leur périphérie. Un talus à pente concave très forte (40 %) sépare les plateaux des versants. Ces plateaux sont orientés selon deux directions perpendiculaires : une direction parallèle à l'axe de drainage, qui est celle de la foliation des gneiss ; une direction perpendiculaire à l'axe de drainage, qui est aussi celle des diaclases et des fissures affectant le gneiss. Au niveau régional, ces plateaux cuirassés sont des témoins du « haut glacis ».
- A l'aval de ces plateaux vient un premier versant : il s'agit d'une surface plane à pente faible. Ce versant, appelé haut de versant est limité à l'aval par une légère rupture de pente, à la hauteur de laquelle affleure, d'une façon discontinue, une cuirasse.
- A l'aval de cette rupture de pente, le haut de versant est relayé, soit par un bas de versant (et dans ce cas, la rupture de pente est peu marquée), soit par une dépression (et dans ce cas, la rupture de pente est souvent marquée par la présence de la cuirasse). Les dépressions sont orientées perpendiculairement à l'axe de drainage, qu'elles rejoignent, c'est-à-dire parallèlement aux diaclases et fissures du gneiss.

La distribution des grands types de couverts végétaux respecte à peu près la topographie du bassin : de l'amont vers l'aval, la savane boisée cède la place à la savane arborée, puis arbustive, puis herbeuse, et enfin à une forêt galerie discontinue.



Figure 2 : Géologie du bassin versant de Booro-Borotou [d'après MOREL, 1986].
Geology of the BOORO-BOROTOU watershed (from MOREL, 1986).

B) LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE STRUCTURALE

L'analyse structurale détaillée de la couverture pédologique de ce bassin versant a été effectuée selon la démarche exposée précédemment. Neuf toposéquences, radiales au marigot, ont été étudiées en détail (fig. 3). Au total, sur les 136 hectares du bassin versant, on a ouvert et décrit :

- 350 fosses, ayant 1 à 6 mètres de profondeur
- 450 sondages tarière, ayant 2 mètres de profondeur
- 1 700 trous, ayant 60 cm de profondeur.

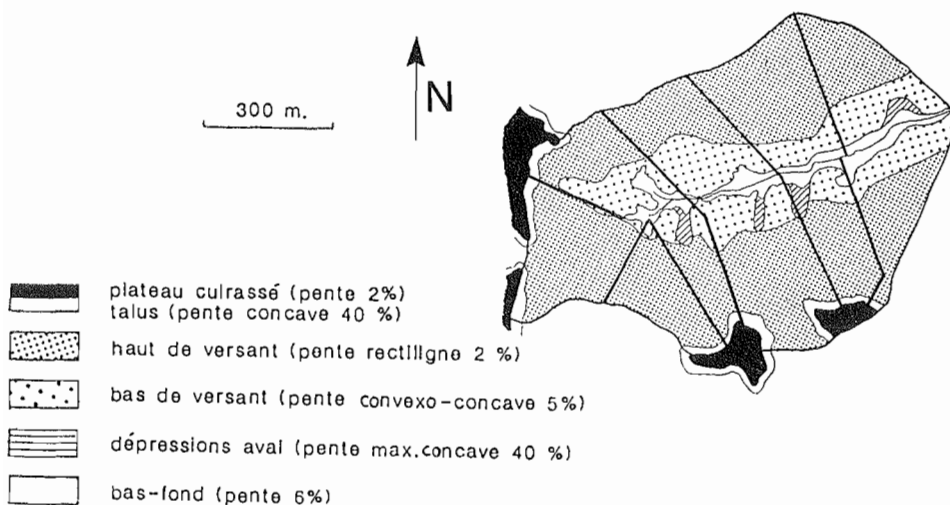


Figure 3 : Géomorphologie du bassin versant de Booro-Borotou et localisation des toposéquences étudiées.

Geomorphology of the BOORO-BOROTOU watershed and location of the studied toposéquences.

Cette analyse structurale a permis de distinguer deux domaines (fig. 4) :

- un domaine dit ferrallitique : il regroupe les plateaux cuirassés et leurs rebords ; il occupe 10 % de la surface du bassin ;
 - un domaine dit transformant qui occupe le reste du bassin versant.
- Le domaine ferrallitique (fig. 4 et 5) est caractérisé par une séquence verticale d'altérites et d'horizons pédologiques. On démontre qu'on a là les organisations pédologiques les plus anciennes.

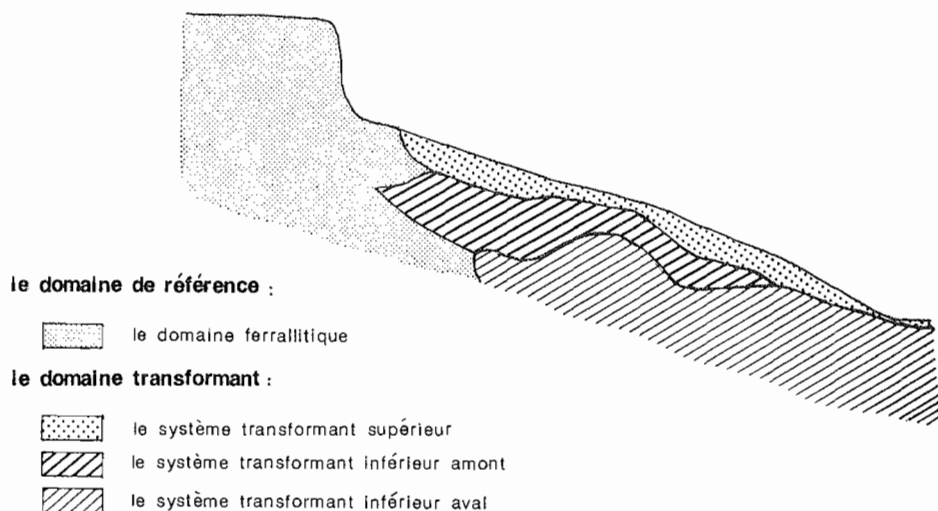


Figure 4 : Schéma de localisation du domaine ferrallitique et des trois systèmes transformants, dans le bassin versant de Booro-Borotou.

Sketch for the location of the ferrallitic domain, and the three transforming systems, in the BOORO-BOROTOU watershed.

— Le domaine transformant (fig. 4) présente des structures qui sont discordantes sur les organisations du domaine ferrallitique : ce domaine transformant est donc postérieur au domaine ferrallitique.

Le domaine transformant est constitué de trois systèmes pédologiques : un système supérieur, un système inférieur amont, un système inférieur aval. Chacun de ces systèmes est caractérisable par un type de dynamique évolutive défini d'après des critères géochimiques, minéralogiques et structuraux.

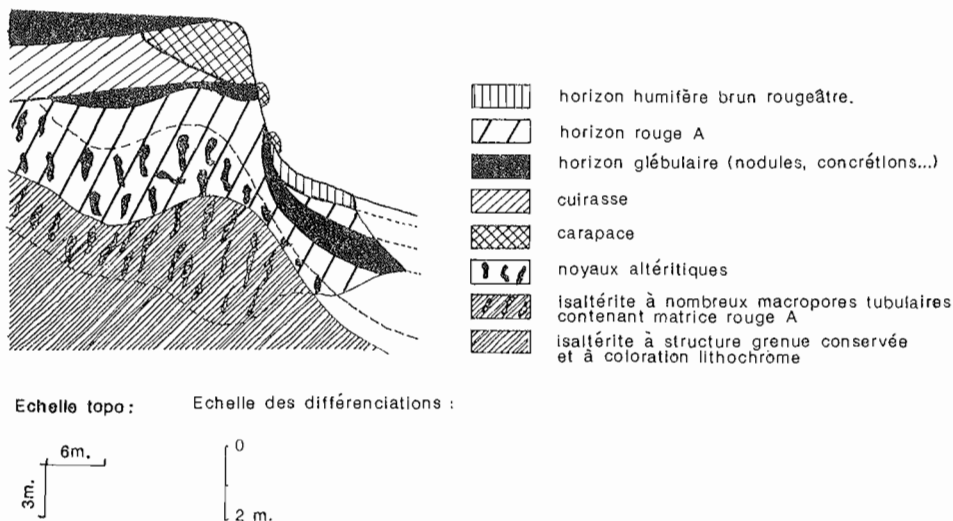


Figure 5 : Les altérites et les horizons pédologiques du domaine ferrallitique.
Weathering formations and soil horizons in the ferrallitic domain.

1. **Le système supérieur** (fig. 6) correspond à des transformations qui se développent à partir de la surface. Il s'agit de la dégradation de la partie supérieure des couvertures ferrallitiques rouges, c'est-à-dire d'un appauvrissement en fer et en argile, croissant vers l'aval. C'est un système exclusivement soustractif et c'est ainsi que naissent et se développent les couvertures ferrugineuses jaunes.

On peut, au sein du bassin versant, retrouver diverses étapes du développement de ce système supérieur (fig. 7) : les versants n'en sont pas tous au même stade de développement, ce qui permet de mettre en évidence la progression latérale remontante, de l'aval vers l'amont, des fronts de transformations. Ces fronts descendent aussi verticalement au sein de la couverture pédologique.

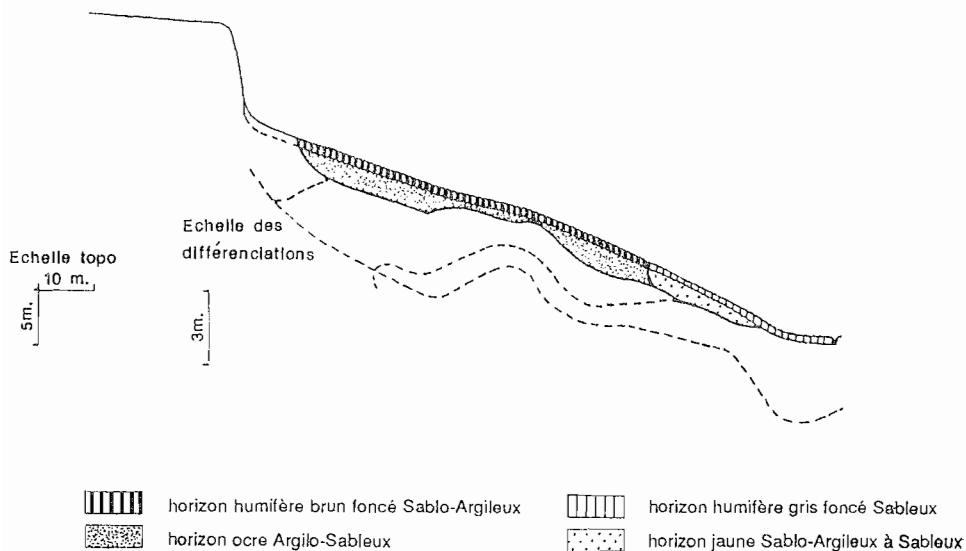


Figure 6 : Les différenciations du système transformant supérieur.
Differentiations in the superficial transforming system.

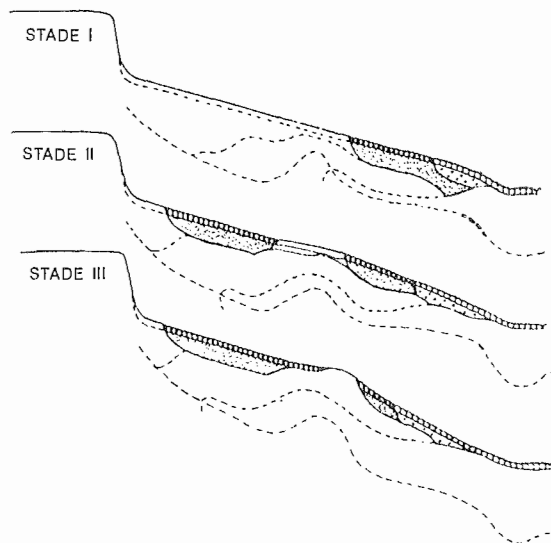


Figure 7 : L'extension, dans l'espace et dans le temps, des différenciations du système transformant supérieur.
Distribution, in space and time, of the differentiations in the superficial transforming system.

2. **Le système inférieur amont**, « cuirassé de versant », se développe en profondeur, au-dessus de la zone d'altération (fig. 8). On y observe une redistribution de fer, avec départ de l'amont et accumulation vers l'aval où il y a formation de deux cuirassements :

- l'un, affleurant ou sub-affleurant, à la rupture de pente à mi-versant, là où il y a remontée du manteau d'altération ;

• l'autre, plus à l'aval et plus en profondeur.

On démontre que ce système se développe au détriment de l'horizon rouge du domaine ferrallitique. Comme pour le système supérieur, on retrouve au sein du bassin versant diverses étapes du développement du système inférieur amont (fig. 9) ; il y a :

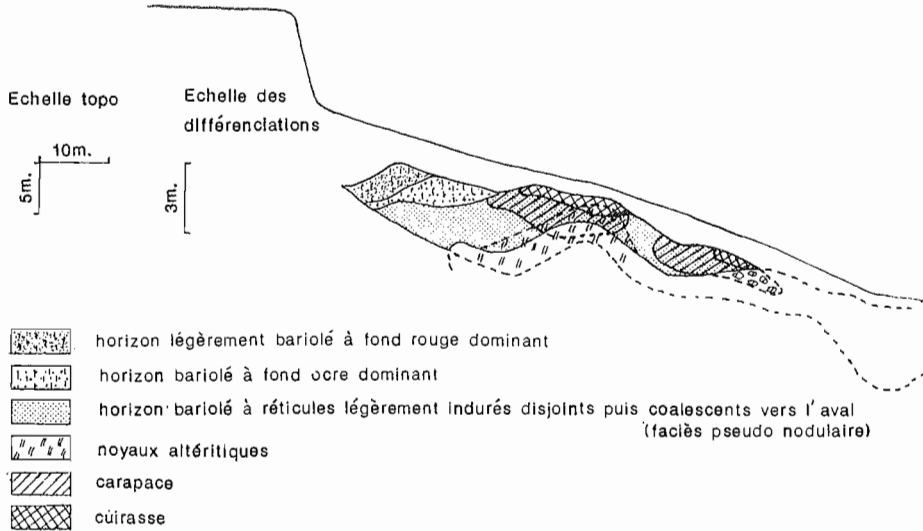


Figure 8 : Les différenciations du système transformant inférieur amont.
Differentiations in the deeper upper transforming system.

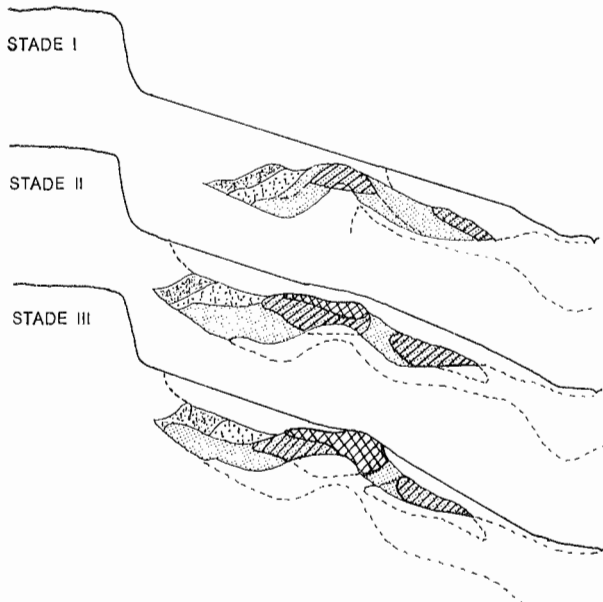


Figure 9 : L'extension, dans l'espace et dans le temps, des différenciations du système transformant inférieur amont.
Distribution, in space and time, of the differentiations in the deeper upper transforming system.

- Remontée latérale vers l'amont, le long du versant.
- Redistribution sur place du fer (ce sont les deux premières différenciations).
- Accumulation relative et absolue du fer (ce sont les trois dernières différenciations).
- Développement du cuirassement, principalement du cuirassement amont qui s'épaissit, se durcit et finit par affleurer. La cartographie précise de ces cuirassements amont, qui correspondent à une proximité de l'altérite fait apparaître des orientations parallèles ou obliques par rapport à l'axe de drainage et de nombreux décrochements « en baïonnette » : on observe là, comme pour les cuirasses amont, l'influence des structures géologiques profondes sur l'individualisation et le développement du système transformant inférieur amont (fig. 10).
- Démantèlement, enfin, du système cuirassé, à partir de la surface, mais aussi en profondeur sous l'action remontante du système transformant inférieur aval.

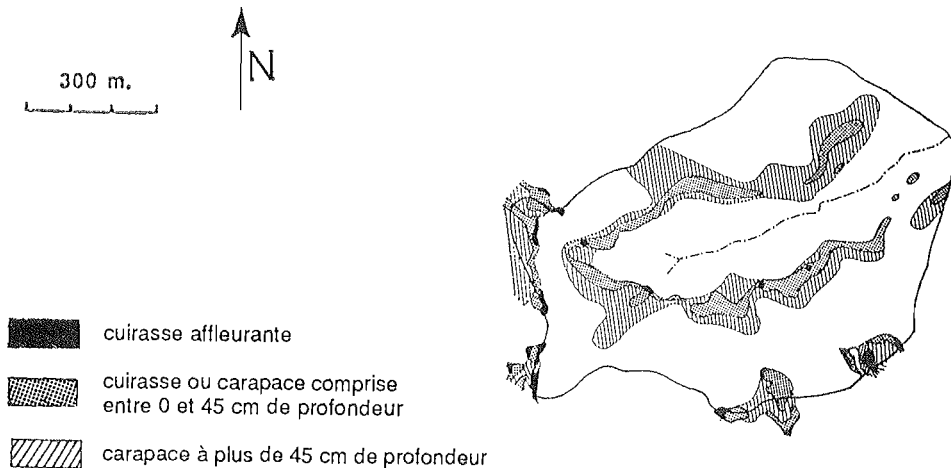


Figure 10 : Distribution des formations cuirassées.

Distribution of the duricrusts formations.

3. **Le système transformant inférieur aval** est un système hydromorphe, avec une forte exportation de fer et d'argile. Son pôle le plus récent, qui est le plus aval, est constitué de sables blancs (fig. 11). Quatre séries de différenciations, emboîtées les unes dans les autres, constituent ce système :

- les deux premières, à la fois les plus amont et les plus anciennes, sont caractérisées par une exportation de fer vers l'aval ;
- les deux dernières sont caractérisées : par de l'exportation de fer ; par de l'exportation d'argile ; par une néoformation localisée d'argile gonflante, principalement dans la partie apicale de la zone d'altération.

Ce système transformant se développe au détriment, à la fois, de la zone d'altération et de la zone de différenciation en horizons qui la surmonte. Vers l'amont et vers le haut, il recoupe et transforme les deux systèmes précédents : il leur est donc postérieur.

Les différentes étapes de développement de ce système inférieur aval, que l'on observe au sein du bassin (fig. 12), montrent qu'il y a, à la fois, extension du système vers l'amont et extension de la différenciation la plus interne, c'est-à-dire

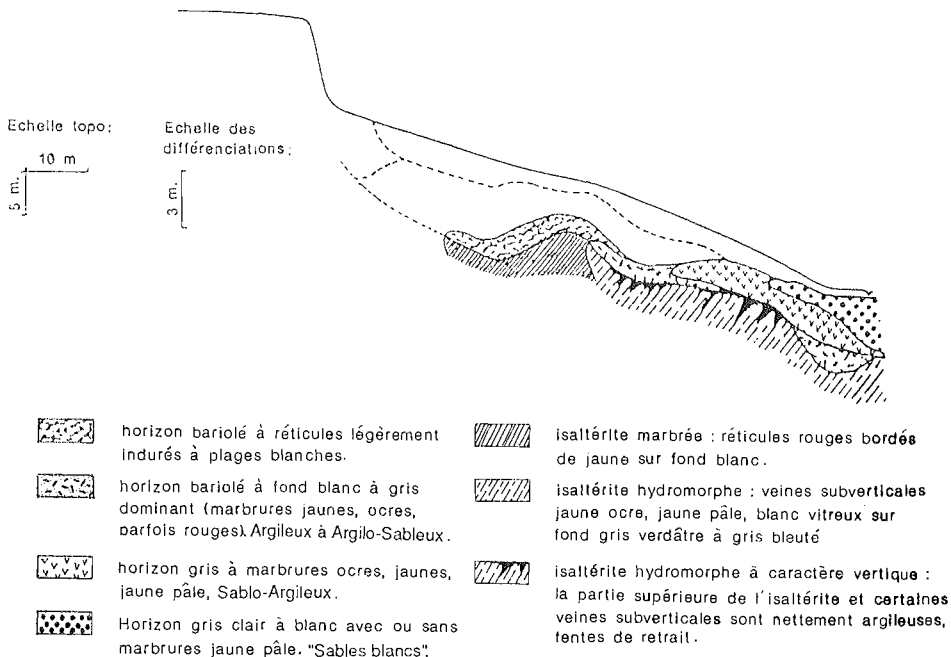


Figure 11 : Les différenciations du système transformant inférieur aval.
Differentiations in the deeper lower transforming system.

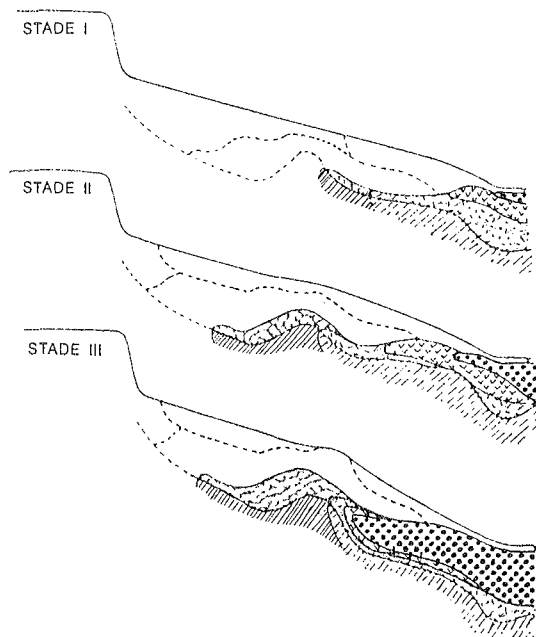


Figure 12 : L'extension, dans l'espace et dans le temps, des différenciations du système transformant inférieur aval.
Distribution, in space and time, of the differentiation of the deeper lower transforming system.

des sables blancs. Au stade ultime de l'évolution, les trois dernières séries de différenciation viennent buter, à mi-versant, au niveau de la remontée du manteau d'altération ; cette évolution s'accompagne d'une modification de la topographie du versant : ainsi, on peut penser que c'est l'extension du système inférieur aval qui est à l'origine de la rupture de pente à la mi-versant.

Le stade ultime de cette évolution correspond aux dépressions de l'aval : étant donné leur orientation, il est probable qu'elles se soient formées à l'aplomb des zones de plus grande fracturation du socle.

Cette analyse démontre que, pour comprendre les distributions ordonnées et les genèses de différenciations verticales que l'on peut décrire en termes de sol rouge ferrallitique, sol ocre ferrugineux, cuirasse, sol jaune hydromorphe, sol sableux, il faut étudier les transformations. En effet, cette distribution ordonnée est la conséquence de transformations successives de la couverture ferrallitique initiale : transformations géochimiques, minéralogiques et structurales, qui ont toutes laissé leurs marques dans la couverture pédologique que l'on observe aujourd'hui. Ces transformations ont démarré à l'aval et se sont développées dans le bassin versant dont elles contribuent à modeler les formes. Les structures lithologiques ont partiellement guidé le sens et l'emplacement de certaines transformations.

Au terme d'une telle étude, on dispose d'un grand nombre de critères pour la reconnaissance et pour la cartographie, à différentes échelles, des structures de la couverture pédologique de cette région. On connaît les ensembles structuraux et les principales étapes de leur différenciation. Les limites qui séparent ces ensembles structuraux sont des fronts de transformation dont on connaît la direction de déplacement.

On peut donc représenter sur les cartes, à la fois les structures, les limites dynamiques qui séparent ces structures, mais aussi les étapes de développement de ces structures : développement des horizons, des ensembles d'horizons, développement de tel ou tel caractère. Ce travail est en cours, pour le bassin de Booro et pour l'ensemble de la région.

V. CONCLUSION

Appliquée à l'analyse détaillée d'une unité de modelé, l'analyse structurale tridimensionnelle se révèle être un outil puissant de compréhension de l'organisation des formations superficielles. Nous avons illustré ici cet intérêt sur l'exemple du bassin versant de Booro-Borotou. Il existe d'autres exemples étudiés en Guyane, au Brésil, en Bretagne,...

Cependant, ce n'est que lors du changement d'échelle, lorsque les résultats acquis à grande échelle pourront être appliqués à petite échelle, que cette démarche, menée à son terme, pourra, étant alors opérationnelle, convaincre.

A l'heure actuelle, même si les exemples détaillés ne sont pas encore assez nombreux, c'est la phase cartographique de l'étude qui doit être développée. L'avenir de l'analyse structurale tridimensionnelle passe par l'exploitation cartographique des résultats acquis lors de l'étude détaillée d'unités de modelé.

Reçu pour publication : Novembre 1988

Accepté pour publication : Décemb. 1989

BIBLIOGRAPHIE

AL SIDDIK M.A., 1983. — La couverture pédologique en forêt de Rennes : analyse morphologique de séquences et cartographie en courbes d'isodifférenciation à grande et petite échelle. Thèse de Docteur ingénieur ENSA. Univ. Rennes, multigr. 125 p.

BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982. — Analyse structurale et cartographie en pédologie : I - Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs

- principaux apports à la connaissance des sols. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. XIX, n° 4, 309-321.
- BOULET R., HUMBEL F.X., 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. vol. XIX, n° 4, 323-339.
- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y.**, 1982. — Analyse structurale et cartographie en pédologie : III - Passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIX, n° 4, 341-351.
- BOULET R., CHAUVEL A., LUCAS Y.**, 1984. — Les systèmes de transformation en pédologie. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES : 167-181.
- BOULET R., GODON P., LUCAS Y., WOROU S.**, 1984. — Analyse structurale de la couverture pédologique et expérimentation agronomique en Guyane Française. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXI, n° 1, 21-31.
- BOULET R., BELLIER G., HUMBEL F.X.**, 1987. — Différenciation toposéquentielle et transformations morphologiques d'un sol brun de Bretagne. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIII, n° 3, 187-196.
- DOSSO M.**, 1986. — Analyse structurale d'une unité de modelé latéritique comme référence pour la recherche d'informations pédologiques d'ordre structural contenues dans les images de télédétection correspondantes. Séminaire Régional sur les Latérites, Douala, p. 211-220.
- DOSSO M., SEYLER F., BOCQUIER G., RUELLAN A.**, 1986. — Analysis of soil organization ; regional mapping using remote sensing ; examples in Brittany (France) and French Guiana. XII Congrès de l'AISS Hambourg, p. 1099-1100.
- FRITSCH E.**, 1977. — Organisation d'une toposéquence de sols sur schiste Bonidoro de Guyane Française. Etude morphologique. ORSTOM, Cayenne, multigr., cote 174, 72 p.
- FRITSCH E.**, 1979. — Etude des organisations pédologiques et représentation cartographique détaillée de quatre bassins versants expérimentaux sur schistes Bonidoro de Guyane française. ORSTOM, Cayenne, multigr., cote P 183, 30 p.
- FRITSCH E.**, 1984. — Les transformations d'une couverture ferrallitique. Analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane Française. Thèse de Docteur 3^e cycle, Univ. Paris VII, multigr. 188 p.
- FRITSCH E.**, 1986. — Les transformations d'un paysage cuirassé du nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques. Séminaire Régional sur les Latérites, Douala, p. 59-76.
- FRITSCH E., BOCQUIER G., BOULET R., DOSSO M., HUMBEL F.X.**, 1986. — Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane française : analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. XXII, n° 4, 361-395.
- HUMBEL F.X.**, 1984. — L'analyse structurale des couvertures de sol, une base pour la cartographie des sols en Guyane. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES : 181-191.
- LUCAS Y., CHAUVEL A., BOULET R., RANZANI G., SCATOLINI F.**, 1984. — Transição latossolos - podzols sobre a formação Bareiras na região de Manaus, Amazonia. Rev. bras. Ciencia de Solo, vol. 8, n° 3, 325-335.
- LUCAS Y., BOULET R., ANDRIEUX P.**, 1986. — Un système pédologique aval en Guyane Française : organisation et fonctionnement hydrodynamique. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. XXII, n° 1, 3-16.
- RUELLAN A.**, 1984. — Les apports de la connaissance des sols intertropicaux au développement de la pédologie : la contribution des pédologues français. Science du Sol, 1984, n° 2, 141-148. Catena, 1985, vol. 12, n° 1, 87-98.
- RUELLAN A., QUEIROZ NETO J.P., PELLERIN J.**, 1985. — Analyse structurale de la couverture pédologique : une expérience d'enseignement et de recherche au Brésil. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXI, n° 4, 253-256.
- RUELLAN A.**, 1986. — Soil vertical and lateral differentiation. Séminaire IBSRAM, Khon-Kaen (Thaïlande), p. 155-168.
- SEYLER F.**, 1986. — Recherche méthodologique sur le traitement d'images de télédétection aérienne, basée sur l'analyse préalable des formations superficielles avec leur couverture végétale. Thèse de Doctorat, Univ. Paris VII, multigr., 262 p.