

Dynamique actuelle de quelques types de sols en AFRIQUE de l'Ouest

- 1 Méthodes d'approche sur le terrain
- 2 Comparaison de l'évolution actuelle du sol en deux stations
 - l'une sous une forêt dense subéquatoriale
(AZAGUIE basse COTE d'IVOIRE)
 - l'autre sous une savane soudano-sahélienne
(GONSE Centre HAUTE-VOLTA)

par

ROOSE (E.J.) *

Communications au Séminaire de l'Union Internationale de Géographie
"Expérimentations de terrain en Géomorphologie"
PARIS 2-7 octobre 1978

O.R.S.T.O.M. PARIS, septembre 1978

* ROOSE, Maître de Recherche Principal en pédologie à l'O.R.S.T.O.M.
(Office Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer)
actuellement laboratoire Géologie Appliquée, Université ORLEANS
45045 ORLEANS CEDEX FRANCE

Collection de Référence

B. 3623 P. do

Résumé

Dans une première partie, sont critiquées quatre approches utilisées parallèlement par les pédologues pour étudier la dynamique des sols sur un versant. Plusieurs dispositifs sont décrits qui permettent d'estimer les vitesses d'actions des principaux moteurs de l'évolution. Pour modéliser l'influence des nombreux facteurs qui agissent sur l'érosion deux types de simulateurs de pluie utilisés par l'O.R.S.T.O.M. en COTE d'IVOIRE sont proposés.

Chaque méthode donne des résultats fragmentaires, donc complémentaires, à l'échelle de la parcelle. L'auteur suggère quelques tentatives pour résoudre le problème délicat du passage de la parcelle au versant.

Dans la seconde partie, sont comparés les résultats de la méthode des bilans en deux stations bioclimatiques très différentes. Dans les sols ferrallitiques de la zone forestière subéquatoriale de basse COTE d'IVOIRE, les mouvements verticaux de matières (lixiviation des solubles et lessivage des colloïdes) sont très élevés. Le réseau hydrographique est dense et s'enfonce profondément dans l'épais manteau d'altération : d'où le modelé caractéristique en demi-orange.

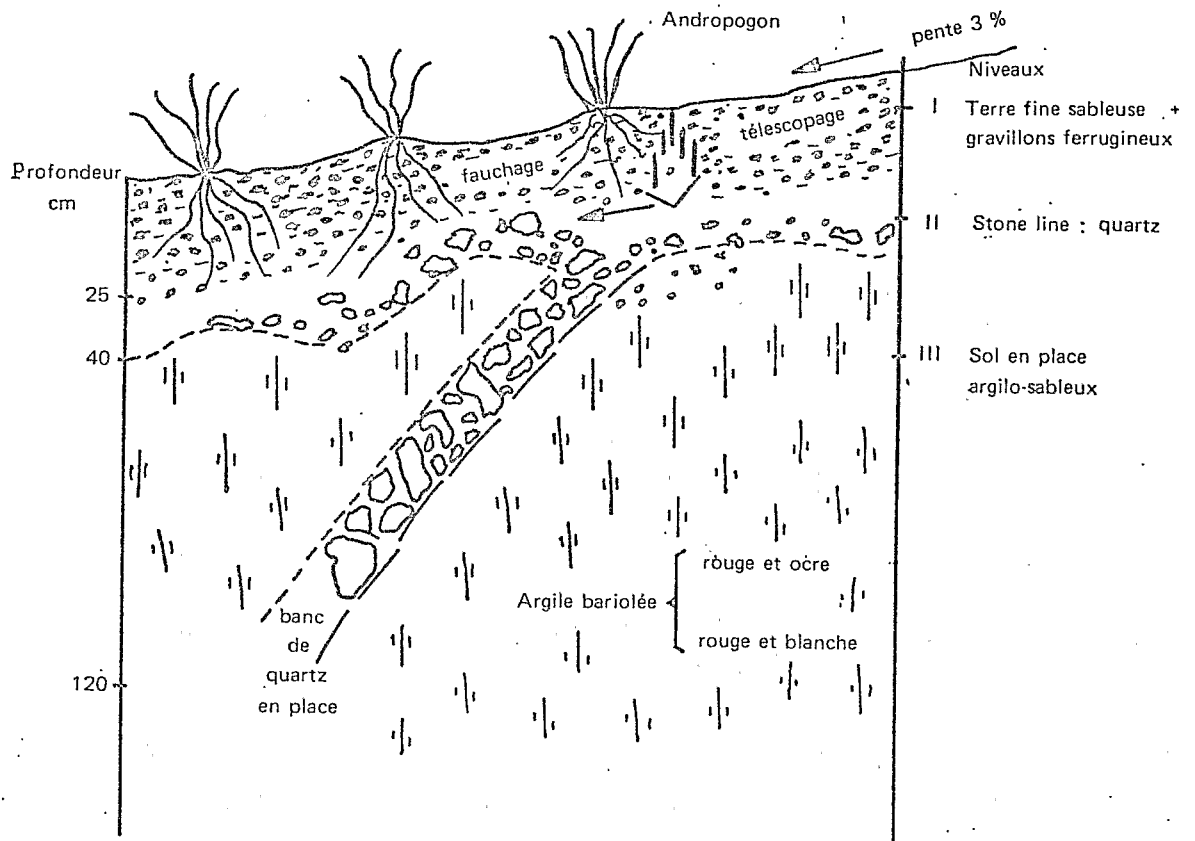
Par contre dans la zone tropicale sèche des savanes soudano-sanéliennes du Centre HAUTE-VOLTA, le ruissellement est très élevé sur les sols ferrugineux tropicaux et le pouvoir évaporant de l'air reste si fort toute l'année que les mouvements verticaux de matière sont réduits au profit des mouvements obliques à la surface du sol. D'où les paysages de buttes témoins cuirassées, les éboulis qui reculent et les longs glacis à pentes très faibles qui séparent un réseau hydrographique peu abondant et temporaire. Cependant dans ces deux zones climatiques les influences de la mésofaune (termites, vers de terre, etc) en milieu naturel et de l'homme en milieu cultivé s'avèrent essentielles sur la vitesse et le mode l'évolution actuelle : ils accélèrent les mouvements de matière à la surface du sol.

Summary

In the first part, are described four approaches used by soil scientists for the studies on actual soil evolution on a hillside. Many devices are developed which allow to estimate the input and output of the "box" which constitutes the soil. For a mathematic approach of the influence of each factors reacting on erosion, two rainfall simulator types are proposed which are used by O.R.S.T.O.M. in Ivory Coast. Each method gives only fragmentary, thus complementary results on plot scale. The author suggests some tentatives to solve the difficult problem of the passage from plot to watershed scale.

In the second part, the author compares the data of the "dark box" approach collected in two bioclimatologically very different experimental stations. In the ferrallitic soils of the subequatorial forest area of Ivory Coast, vertical matter movement are very active (solutes and colloïdes leaching). The river system is dense and sinking deeply into weathered blanket : that gives the so typical demi-orange.. hill-shading.

On the other hand, in the dry tropical area of the soudanese bush savannah of the Central Upper-Volta, the runoff is so important on the ferruginous tropical soils and the potential evapotranspiration remains so high during the whole year that vertical movements of matter are reduced to the benefit of lateral movement on the soil surface. Therefore, in this area we can see landscapes of lateric cuirassed plateau, the retreating scree and long weakly sloped glacis with scarce and discontinue rivers. Nevertheless, in both climatical areas, the influence of termites and worms, under natural cover and the influence of man, under cultivated cover, greatly interfere with the speed and the type of actual pedogenesis by accelarating the matter movements on the top of the soil.



- Le filon de quartz montre que le niveau III est bien en place
- La masse de terre fine a fondu sur place et le filon a été télescopé (= stone line) et fauché (les gros morceaux ont été entraînés dans le sens de la pente topographique)

FIG. 1 — Profil pédologique d'un sol ferrallitique remanié «ocre rouge» situé à mi-pente du bassin versant de KORHOGO (Nord Côte d'Ivoire).

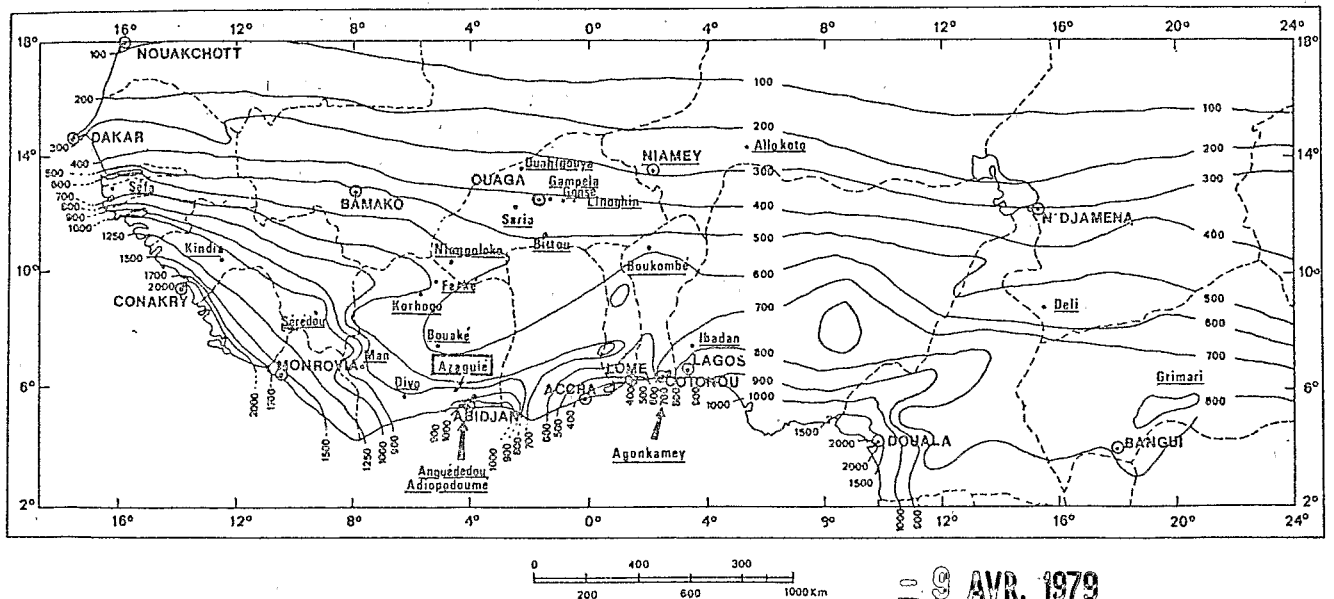


FIG. 2. — Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (RUSA de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre. Situation des parcelles d'érosion. D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.

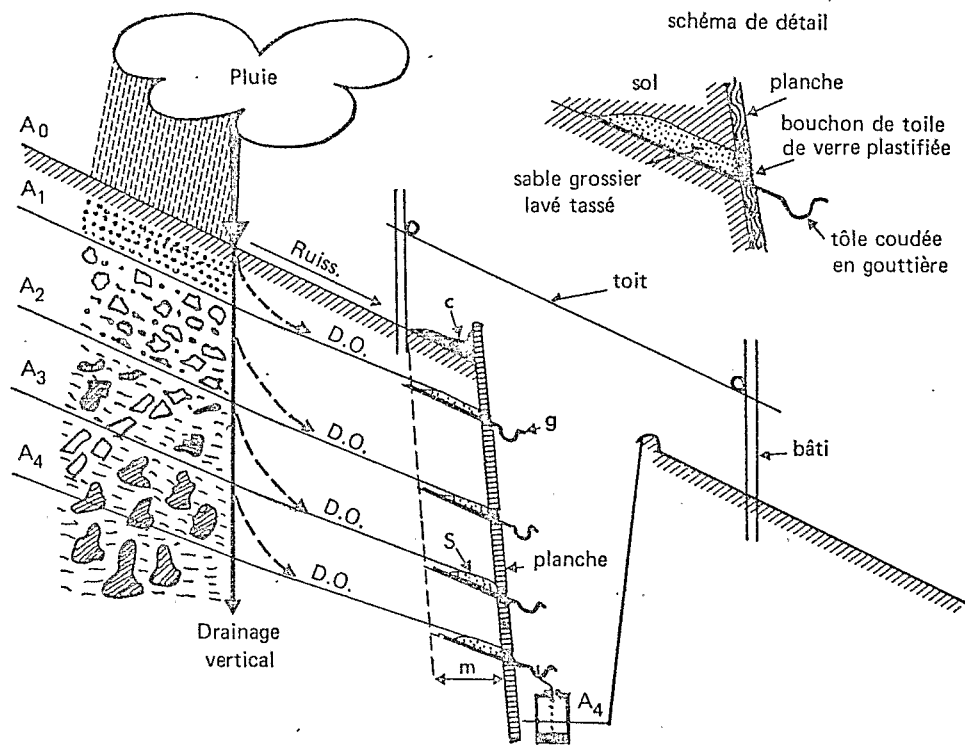


FIG. 3 — Schéma d'une case de lessivage oblique. Pluie, ruissellement, drainage oblique (D.O.) et vertical, toit de tôle, canal de ruissellement (c) vers cuves avec partiteur, fentes remplies de sable grossier lavé (S), gouttières plastifiées (g), mur du sol (m) protégé des pluies et du ruissellement par le canal c, planches de soutènement en IROKO plastifiées.

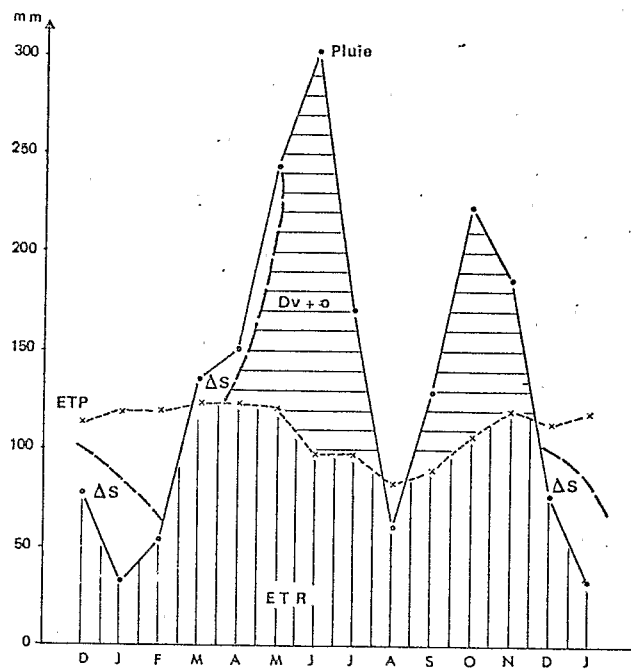


FIG. 4. — Schéma du bilan hydrique moyen sous forêt du Téké.

P : pluie ; ETR : évapotranspiration réelle calculée ; ETP : évapotranspiration potentielle calculée ; DV+o : drainage vertical et oblique ; Δs : variations du stock d'eau du sol.

Pluies (mm)	33	54	136	151	245	302	170	61	128	223	186	78	1 767	100 %
Ruiss. (mm)	0	0	2	3	5	9	3	0	3	5	4	1	35	2
ETP Turc (mm)	119	119	123	123	121	98	98	83	90	107	120	113	1 314	74
ETR estimé	33	54	123	123	121	98	98	61	90	107	120	77	1 105+200	73,8
DV estimé	0	0	11	25	119	195	69	0	35	111	62	0	627-200	24,2
DV corrigé	0	0	0	0	0	150	69	0	35	111	62	0	427	24,2

var. stock humidité du sol : 200 mm

Collection de Référence

n° 9629 Peda

AVR. 1979

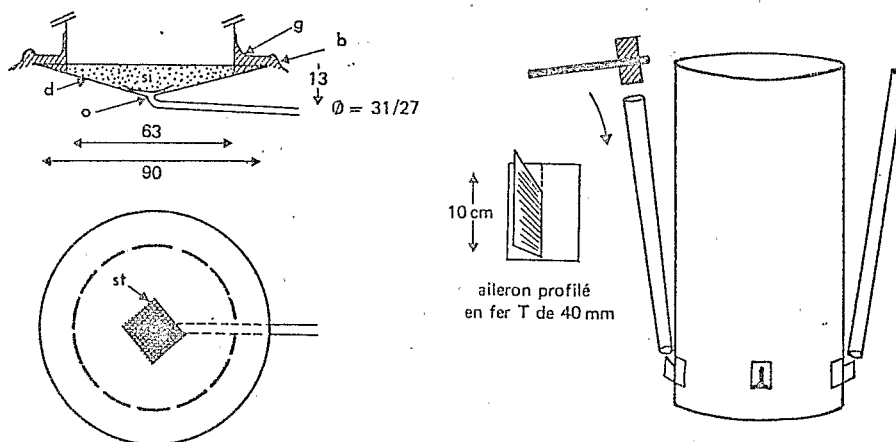
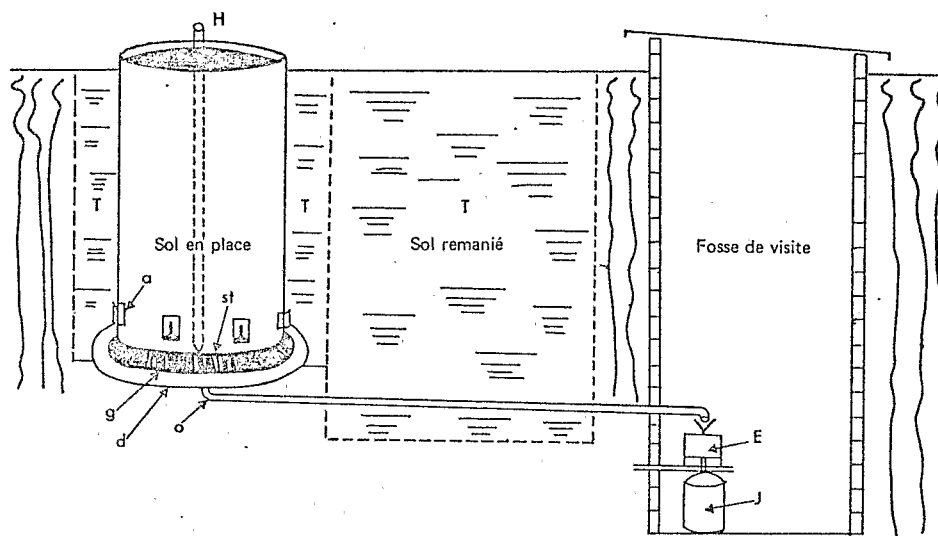


FIG. 5. — Schéma d'un lysimètre monolithique cylindrique. T : tranchée temporaire (sol remanié) ; g : joint de goudron ; d : drain en entonnoir ; st : sable et toile en nylon protégeant l'orifice de drainage o ; E : enregistreur à godet ; J : jerrycan 60 litres ; H : tube d'accès pour sonde à neutrons et à rayons gamma ; a : aileron ; b : bourrelet en argile pour couler le goudron.

- 9 AVR. 1979

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 9629 Pedro

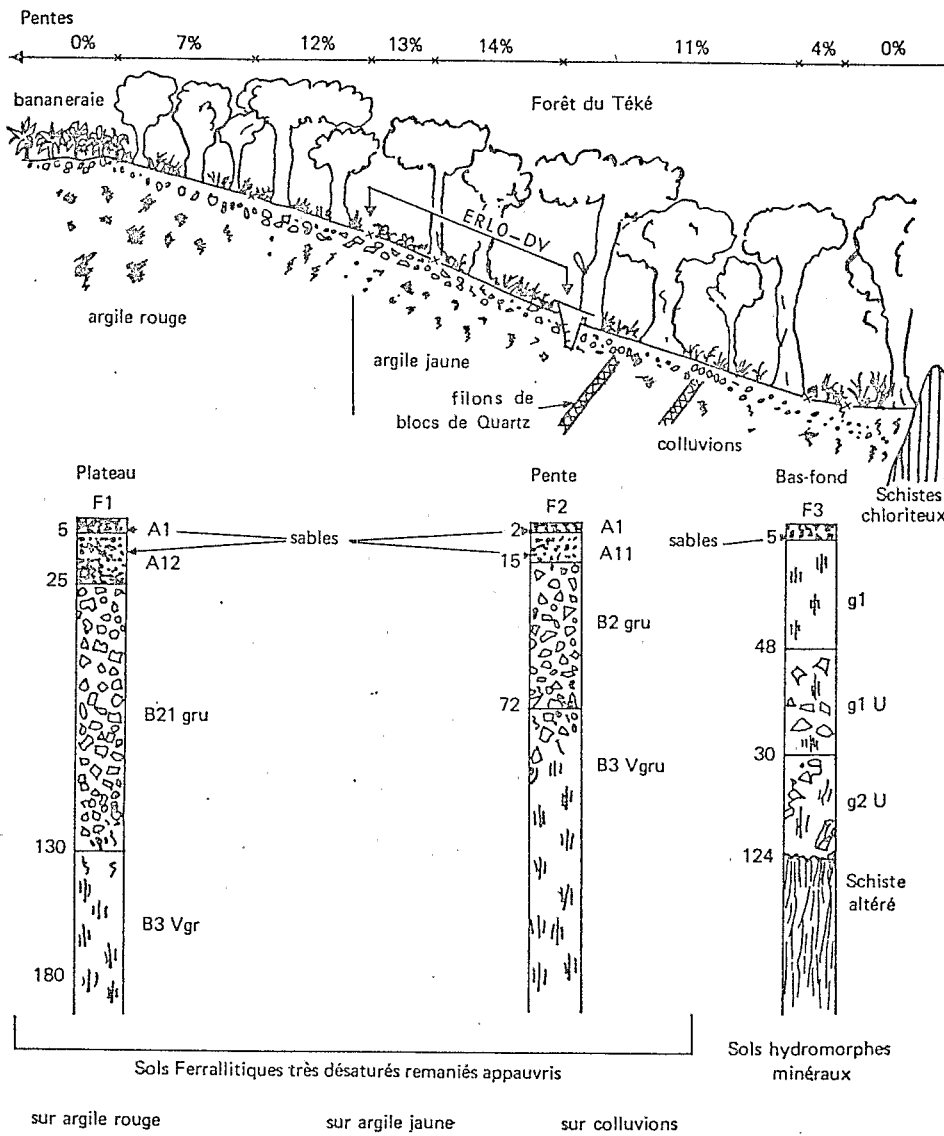


FIG. 6 — Toposéquence de la forêt du Téké. (AZAGUIÉ, basse Côte d'Ivoire)

9 AVR. 1979

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 9629 Pedo

Introduction

Si les géomorphologues étudient les formes que prend la surface de la terre (ROUGERIE, 1960; BIROT, 1973 ; DRESCH, 1966), les pédologues s'intéressent également aux formes du paysage depuis qu'ils se sont aperçus de l'existence de relations génétiques entre les sols d'une même toposéquence (BOCQUIER, 1971 ; BOCQUIER, MILLOT, RUELLAN, 1974 ; BOULET, 1975 ; BOULET, BRUGIERE, HUMBEL, 1978 ; DUCHAUFOUR , 1968 ; SEGALEN, 1969 ; etc...).

L'étude des mêmes objets naturels amène progressivement les pédologues et géographes à utiliser les mêmes méthodes tant au laboratoire que sur le terrain (AVENARD, ROOSE, 1972).

Dans la première partie de cette note est présenté un résumé de l'arsenal des méthodes dont disposent actuellement les pédologues expérimentalistes pour aborder la dynamique actuelle des sols en régions tropicales, en insistant sur leur philosophie et leurs limites et en se référant essentiellement aux travaux des chercheurs de l'ORSTOM (1) et du G.E.R.D.A.T. (1) en AFRIQUE du Nord et de l'Ouest.

Dans une seconde partie seront brossés les principaux résultats des observations et mesures effectuées pendant huit années en deux stations d'AFRIQUE de l'Ouest - l'une subéquatoriale et l'autre subsaharienne.

Les différents moteurs de la pédogenèse actuelle seront ainsi précisés et des conclusions générales sur l'évolution des versants propre à chaque zone bioclimatique pourront être tirées.

Note 1 O.R.S.T.O.M. = Office de la Recherche Scientifique et Technique
Outre-Mer (FRANCE)

G.E.R.D.A.T. = Groupe d'Etudes et de Recherches sur le Développement
de l'Agriculture Tropicale.

PREMIERE PARTIE.

METHODES D'APPROCHE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DES SOLS.

Nous distinguerons quatre voies de recherche qui ont été empruntées successivement ou parallèlement par les pédologues pour saisir l'évolution d'un profil de sol qui peut-être défini comme "le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent". (AUBERT et BOULAINÉ, 1967).

1° Approche morphologique et instantanée. (fig.1)

Tout pédologue examine et décrit de façon très fouillée tous les éléments du profil ainsi que leur répartition dans le sol et dans le paysage. Cette approche macromorphologique, doublée de l'étude des lames minces et de l'analyse d'échantillons bien repérés, permet aux pédologues d'émettre des hypothèses interprétatives sur l'histoire et la genèse des sols étudiés. Ainsi l'analyse morphologique du profil présenté sur la figure 1 (Bassin de WARANIENE, Nord COTE D'IVOIRE) permet de tirer des conclusions sur le télescopage du niveau de terre fine superficielle et sur le mouvement de sa masse le long de la pente topographique.

Récemment (AUDRY et al, 1973) une équipe de pédologues de l'O.R.S.T.O.M. a collationné et critiqué toute une série de méthodes de terrain permettant de préciser les différents types de porosité, la dynamique de l'eau et de l'air, les potentialités de circulation de l'eau, des solubles et des solides à travers le profil et la toposéquence. Par ces méthodes BOCQUIER au TCHAD, RUELLAN au SENEGAL, BOULET en HAUTE-VOLTA, BOULET et HUMBEL en GUYANE ont expliqué la formation des toposéquences qu'ils ont étudiés.

Ce n'est pas notre propos d'approfondir ici ces méthodes propres aux pédologues qui ont pourtant donné lieu à quelques très belles études de versants. Les méthodes liées aux propriétés physiques du sol ont heureusement complété l'analyse trop statique des descriptions classiques mais les théories explicatives ne font pas l'unanimité des chercheurs.

2° Approche dynamique, agro-pédologique de l'évolution des horizons superficiels

Très tôt, pédologues et agronomes furent confrontés aux problèmes de l'évolution rapide des sols tropicaux sous culture. Trompés sur la richesse des sols de ces régions chaudes, par la luxuriance des forêts tropicales, les colons ont procédé à des défrichements brutaux sur de grandes surfaces et constatèrent après quelques années de culture l'épuisement des terres et le développement rapide des phénomènes d'érosion (ROOSE, 1967, 71, 77).

Le prélèvement et l'analyse d'échantillons de sols répétés à date fixe au cours des années, la comparaison des propriétés physiques et chimiques avec les rendements des cultures ont permis de montrer la dynamique très rapide et quasi réversible en ces sols soumis aux pluies violentes, des matières organiques et des éléments minéraux nutritifs (BLIC, 1976 ; FAUCK, MOUREAUX, THOMANN, 1969 ; BAYER, 1959 ; CHARREAU, FAUCK, 1970 ; LE BUANEC, 1972 ; SIBAND, 1972 ; ROOSE, 1977).

Ces études ont conduit aux notions de fragilité des sols tropicaux et d'instabilité de leur structure, ou encore de plantes dégradantes ou protectrices contre l'érosion, notions marquant parfois une confusion entre la cause et les effets : seule l'agressivité des pluies tropicales explique les phénomènes d'érosion spectaculaires qu'on peut y découvrir lorsqu'on dénude le sol (ROOSE, 1973, 75, 77).

Ces méthodes n'intéressent généralement que les horizons superficiels les plus vulnérables et les plus dynamiques mais se heurtent à des problèmes d'échantillonnage (hétérogénéité latérale et verticale) et d'évolution des méthodes d'analyses puisqu'elles s'étalent sur de très longues périodes.

3° Approche expérimentale basée sur les bilans d'eau et de matières.

Au-delà des descriptions morphologiques fines, des études détaillées des propriétés physiques du milieu et des suivis agropédologiques, l'O.R.S.T.O.M. a entrepris dès 1950 de mesurer sur le terrain les mouvements d'eau et de matières sous l'influence des précipitations naturelles.

Il s'agit de mesurer à l'aide d'une série de dispositifs simples ce qui entre et ce qui sort du sol, sorte de boîte noire, dont on cherche à définir l'évolution actuelle, bien plus qu'à expliquer l'histoire passée.

En vue de calculer des bilans d'eau, des solubles et des solides qu'elle transporte, on a mis au point différents modèles, parcelles de petites tailles (0,3 à 250 m²) mais bien définies et homogènes, dont on respecte au mieux l'architecture de l'espace poral (ROOSE 1968 ; ROOSE, des TUREAUX 1970 ; ROOSE 1972).

3.1. La case d'érosion. (photo 1, fig. 2)

Elle comprend un pluviographe et un petit champ expérimental (100 à 5000 m²) isolé des eaux extérieures par une bordure de tôle, champ au bas duquel on mesure les pertes en eau et en terre recueillies dans deux cuves de stockage reliées par un partiteur (voir photo 1). Sous l'impulsion du professeur FOURNIER, (1954) tout un réseau de parcelles d'érosion fut mis en place en AFRIQUE Centrale et Occidentale (voir fig. 2) ainsi qu'à MADAGASCAR.

La méthode est classique mais demande de nombreuses répétitions dans l'espace et dans le temps et nécessite d'être appliquée avec soin (bordure en matériaux durs, tarage sur place du partiteur, échantillonnage soigné des suspensions et des terres érodées) : la précision ne dépasse guère 10 %. Chaque site doit comporter une parcelle de référence : elle a été définie par WISCHMEIER et SMITH (1960) comme une parcelle nue, travaillée, sans apport organique depuis trois ans sur une pente de 9 % et de 22 mètres de long : elle seule permet d'évaluer l'érodibilité du sol et de relier les observations locales aux données des autres chercheurs.

Critique.

Cette méthode est longue, demande beaucoup de main-d'oeuvre et donne des valeurs relatives de l'érosion en fonction de différents traitements plutôt que des valeurs absolues des mouvements d'eau et de terre tout au long de la topographie. Il est cependant possible de combiner une batterie de parcelles englobant des fractions de plus en plus importantes du versant : cette méthode a été utilisée avec profit par PONTANIER dans un paysage à croûtes gypseuses du Sud Tunisien (1973).

Par ailleurs de nombreux auteurs ont tenté de relier les observations effectuées sur petites parcelles à celles sur bassins versants de tailles diverses emboîtés ou non : par exemple HEUSCH (1970-71), au MAROC, VUILLAUME (1968) au NIGER ROOSE puis COLLINET en COTE D'IVOIRE. En combinant les mesures de ruissellement à la case d'érosion à celles de la pluie (pluviographe) de l'évapotranspiration potentielle (bac A) et aux variations maximales du stock d'eau du sol, il est possible de calculer le bilan hydrique avec une précision satisfaisante. Malgré la lourdeur de la méthode, la case d'érosion reste un moyen privilégié pour aborder l'étude des mouvements de surface et du bilan hydrique à l'échelle du champ.

3.2. La case de lessivage oblique. (fig. 3 photos 2 et 3)

A partir de 1964 fut mis au point un dispositif capable de recueillir, outre le ruissellement et l'érosion à la surface du sol, les eaux libres circulant à l'intérieur du profil pédologique ainsi que leur charge soluble et solide (ROOSE, 1968). La case ERLO est un type de lysimètre particulier (voir fig. 3 photos 2 et 3) dont le fond est constitué d'horizons peu perméables et les côtés sont libres car les eaux circulent normalement dans le sens de la plus grande pente. Pour capter les eaux libres circulant obliquement à l'intérieur du sol on protège le mur amont d'une fosse pédologique des eaux de drainage vertical (toit et canal de ruissellement) et on enfonce des tôles en forme de gouttières dans des fentes ménagées sous chaque horizon : du sable grossier lavé (tassé entre les gouttières et le sol) et des planches en bois résistant vitrifié retient le tout en place. Le mur amont étant protégé, on ne peut recueillir dans les gouttières que des eaux libres accumulées au-dessus des limites des horizons de moins en moins perméables.

Critique

Ce modèle particulier de lysimètre à l'avantage de respecter la structure des sols et d'englober une grande partie de la maille d'hétérogénéité du milieu. Par contre, il est difficile de préciser l'origine des eaux de drainage oblique recueillies. On a remarqué également que, là où les écoulements obliques sont rares, il se produit des accumulations de matières mobilisables dans la zone du mur protégé si bien que les teneurs dans les eaux de drainage oblique semblent parfois plus élevées que dans les eaux recueillies dans les lysimètres classiques.

Si ce dispositif ne permet pas de mesurer les termes du bilan hydrique, il donne par contre des renseignements précieux sur la charge en éléments solubles et solides des eaux circulant à différents niveaux du sol avec l'eau libre : par des calculs simples, on peut évaluer le bilan hydrique et ensuite les migrations de matières (ROOSE, 1978).

Le bilan hydrique peut être évalué (voir fig. 4), avec une bonne précision, par périodes (1 - 10 - 30 jours) à partir des données de pluie, de ruissellement, d'une estimation de l'E.T.P. (pour cette période) et des variations du stock d'eau du sol (humidité à capacité au champ moins profil sec en fin saison sèche).

$$\text{Pluie} = \text{Ruiss.} + \text{Drain.} + \text{E.T.R.} \quad \pm \text{ var Stock}$$

Durant la saison sèche, E.T.R. = Pluie - Ruiss. : il n'y a pas de drainage potentiel.

Durant la saison des pluies, E.T.R. \approx E.T.P., et Drain. = Pluie - Ruiss. - E.T.P. aux variations du stock d'humidité près. En effet, après l'arrêt des pluies, E.T.R. n'est pas nulle, elle consomme les réserves hydriques du sol.

Par ailleurs, avant de percoler à travers le profil, les eaux d'infiltration doivent ramener l'humidité du sol à la capacité au champ.

Il faut donc ajouter à l'E.T.R. la lame d'eau correspondant aux variations du stock d'eau du sol et le soustraite au drainage (= drainage corrigé).

3.3. Les cases de drainage vertical. (fig. 5 et photo 4)

Dans les milieux étudiés, le drainage vertical représente une fraction importante du bilan hydrique annuel à l'échelle de la parcelle : le drainage diminue de 50 % en zone subéquatoriale à moins de 5 % en zone sahélienne. Nous avons donc été amené à doubler notre réseau de cases ERLO en construisant 91 lysimètres monolithiques cylindriques en vue de mesurer le drainage vertical dans le sol en place, de recueillir les eaux libres de percolation et de quantifier leur charge soluble et solide (ROOSE, des TUREAUX, 1970). Ces dispositifs (voir fig. 4 photo 4) consistent en un monolithe de sol non remanié de 63 centimètres de diamètre (possibilité d'y faire des mesures neutroniques) isolé par un cylindre de tôle fine enfoncé jusqu'à un entonnoir de 90 cm de diamètre situé vers 40 - 80 - 140 ou 180 cm de profondeur. Du goudron souple (40/80) coulé à chaud assure l'étanchéité aux contacts cylindre/entonnoir et cylindre/monolithe de sol. D'après les chercheurs de la station hydroagricole de COSHOCTON, OHIO (KONKHE, HARROLD, DREIBELBIS, 1940 - 58 - 67), la profondeur des lysimètres est au moins aussi importante que leur surface car une partie des eaux drainant dans la nature est retenue par la tension capillaire à l'interface sol/tôle du fond de lysimètre, à moins d'y appliquer une tension. En général, plus la texture du sol est fine plus la porosité est fine et plus le lysimètre doit être profond (profondeur = 1 mètre sur sol sableux = 1,50 m sur sol argilo-sableux et plus de 2 mètres sur sol très argileux).

Critique

Les cases de drainage vertical ont donné satisfaction sous des couverts bas et homogènes (savane herbeuse, fourrages, maïs, ananas, etc...) mais sont inadaptés aux études sous forêt et cultures à grand écartement à cause des dimensions des racines et de l'hétérogénéité des précipitations sous la voûte foliaire. Ces lysimètres ne peuvent donner aucun renseignement sur les migrations de matières dans les horizons superficiels (les plus exploités par les végétaux) à moins de les construire peu profonds et d'y appliquer une suction. De plus, ils n'englobent pas la maille d'hétérogénéité du sol : il est donc nécessaire de prévoir au moins 4 répétitions par objet de comparaison. Enfin, ils ne peuvent rendre compte des migrations qui s'effectuent dans la nature dans les fentes de retraits, les trous d'animaux, racines pourries et divers mégapores qui, malgré leur fréquence relativement faible piègent le ruissellement et alimentent les écoulement profonds.

3.4. Dispositifs secondaires.

A ces installations relativement spectaculaires furent associés divers dispositifs secondaires soit pour préciser le bilan hydrique soit pour évaluer les remontées biologiques.

Les variations maximales du stock d'eau du sol furent évaluées à l'aide de l'humidimètre à neutrons dans des tubes d'accès de 2 à 6 mètres de profondeur (BOIS, ROOSE, 1978). Les précipitations au-dessus du couvert forestier furent mesurées à l'aide de pluviographes reliés à leur réceptacle soudé au sommet de grands mâts ; sous le couvert on a fait appel à des pluviomètres linéaires intégrant mieux l'hétérogénéité.

Les remontées de terre par les vers furent estimées par des pesées régulières des turricules sur une quinzaine de placettes de 1 m² (2 piquets et 1 cadre) (ROOSE, 1976).

Les remontées de terre par une espèce moissonneuse de termites (*Trinervitermes*) ont été estimées à 1200 kg/ha/an par approches successives. D'abord calcul des corrélations entre le volume, le poids des termitières et différents paramètres facilement mesurables sans rien détruire (hauteur max., diamètres maxi et mini à la base). Ensuite marquage des volumes à l'aide de taches de couleur au latex (coloris différents à chaque inventaire annuel) et mesure des nouveaux édifices. Enfin estimation de l'érosion des nids abandonnés par pesées successives de nids abandonnés posés sur une toile plastique et exposés aux intempéries.

Les litières forestières sont estimées à partir de récoltes hebdomadaires sur dix cadres de 1 à 4 m² (BERNHARD, 1970) tandis que la production herbagère de la savane se mesure en début de saison sèche avec des cadres semblables.

4° Approche : Simulation de la pluie et modélisation.

Tous les dispositifs précédents ont été utilisés depuis 5 à 20 ans sur le terrain sous les précipitations naturelles. La synthèse des résultats est en cours (ROOSE, GODEFROY, 1977) ; ROOSE 1978). Mais dès 1963, nous est apparue la nécessité de passer à la simulation des pluies pour envisager, au-delà des comparaisons de situations locales, de modéliser l'influence des nombreux facteurs qui déterminent le niveau de l'érosion.

4.1. Le simulateur (photos 5 et 6)

C'est au Colloque d'ABIDJAN de la société Internationale de la Potasse en décembre 1973 que fut présenté par l'ORSTOM un simulateur de pluie mobile, capable d'irriguer 200 m² de façon homogène sous 4 intensités de base (30 - 60 - 90 et 120 mm/h) pendant plusieurs heures. Il a été construit en s'inspirant du "Rotating boom rainfall simulator" de SWANSON (1965) mais fut adapté aux rudes conditions des pistes africaines. Il a déjà réalisé une douzaine de mois de mission au SAHEL et dans toute la COTE d'IVOIRE.

Il comprend trois ensembles de dispositifs :

- le premier assure le stockage d'eau claire (pompe 20 CV ; camion citerne 10 t, 2 réserves de 30 m³).
 - le deuxième permet la répartition des précipitations (pompe 10 CV, 500 m. de tuyaux, charriot supportant une boîte à eau, un régulateur de pression, 30 gicleurs et 30 vannes répartis sur 10 bras tournant à 4 tours/mm).
 - le troisième assure les mesures de ruissellement et d'érosion (2 parcelles de 50 m², canal de réception, 2 cuves ¹/4 m³ et pompe de vidange rapide).
- D'après VALENTIN (1978), l'énergie des pluies simulées est voisine de celle des pluies naturelles de 90 et 120 mm/h.

Critique

C'est un dispositif coûteux en matériel et en personnel (4 chercheurs et 4 techniciens peu spécialisés) mais il accélère considérablement les études d'érosion car il permet de simuler des pluies de fréquence rare, les plus importantes. En deux mois il permet de réaliser une douzaine de pluies sur chacun des 4 ou 5 types de sols qui constituent une toposéquence et une analyse fine de l'infiltration (ou du ruissellement), des variations du stock d'eau du sol (dose et intensité d'irrigation), de l'érosion et dans certaines conditions, des transports solides et solubles à la surface et dans le sol.

La surface du sol est suffisante pour intégrer une bonne partie de l'hétérogénéité du sol. Ce n'est cependant qu'un test qu'il faut raccrocher à une échelle de référence (parcelle d'érosion sous pluie naturelle) car on devine l'influence de la variable temps sur l'évolution des propriétés du sol et on se heurte au problème de la longueur de pente : les relations entre l'érosion et la longueur de pente changent avec le type de sol et surtout avec le type d'aménagement de leur surface. En effet, l'érosion mesurée en parcelle a deux composantes : l'érosion en nappe vraie (qui dépend de l'énergie cinétique des pluies, de la perméabilité et de la cohésion du sol) et l'érosion en rigole (qui dépend aussi de la résistance du sol aux forces de cisaillement développées par le ruissellement). Or les rigoles ne débutent sur une surface planée qu'après une certaine hauteur de précipitation et après une certaine longueur de pente, variable en fonction du sol et de son aménagement (photos 6 : parcelle sous pluie simulée avec colorant).

4.2. Infiltromètres de ASSELINE et VALENTIN.

Récemment, ASSELINE et VALENTIN (1977) mirent au point un dispositif simple et robuste (voisin de l'infiltromètre de BERTRAND et PARR, 1960), en vue de mesurer l'infiltration dans des conditions proches de celles qui existent dans la nature. Les méthodes classiques MÜNTZ, PIOGGER, VERGIÈRE et PORCHET donnent en effet des valeurs trop optimistes de la perméabilité car elles négligent la destruction de la structure par l'énergie des gouttes de pluie et se déroulent sous une pression d'eau (3 à 10 cm) jamais atteinte dans la nature. Cet appareil comporte un seul gicleur basculant en haut d'une tour (h = 3,5 mètres) et simule sur une parcelle de 1 m² l'intensité des pluies variant à volonté de 30 à 140 mm/h avec des énergies très voisines de celles des pluies naturelles (VALENTIN, 1978). Cet appareil est utilisé systématiquement depuis 1 an en COTE-d'IVOIRE par les hydrologues et les pédologues pour caractériser la dynamique de l'eau sur des toposéquences et des bassins versants. Il pourra sans doute servir de test de stabilité structurale et peut-être aider à classer les sols en fonction de leur érodibilité : pour ce faire il reste à résoudre le problème de l'hétérogénéité du sol et de la longueur minimum des parcelles.

5° CONCLUSIONS SUR LES METHODES.

Les paysages qui font l'objet d'études diverses sont extrêmement variés et posent des problèmes particuliers. Il est donc heureux de pouvoir disposer d'un arsenal de méthodes parmi lesquelles il nous faut choisir les plus adaptées aux problèmes posés, à l'échelle envisagée et aux moyens disponibles. Ces diverses méthodes d'analyse apportent des résultats fragmentaires et donc complémentaires à l'échelle de la parcelle. Le problème du passage de cette échelle parcellaire des pédologues à celle du bassin versant des hydrologues et des géographes, reste difficile malgré certaines tentatives de le dépasser (toposéquences, parcelles et bassins emboîtés).

Avant de nous livrer ses secrets, la nature nous impose un jeu passionnant, celui de découvrir la combinaison de méthodes qui, respectant l'architecture complexe du milieu naturel, nous branche à son écoute.

DEUXIEME PARTIE

COMPARAISON DE L'EVOLUTION ACTUELLE DU SOL en deux stations, l'une sous forêt dense subéquatoriale (AZAGUIE : basse COTE d'IVOIRE) et l'autre sous une savane soudano - sahélienne (GONSE : Centre HAUTE - VOLTA).

Deuxième Communication au Séminaire U.G.I., PARIS 2 - 7 oct. 1978.

Introduction

Dans une première Communication, nous avons schématisé quatre approches permettant l'étude de la dynamique actuelle du sol (donc des versants) et développé un peu plus longuement la méthode des bilans. En vue de quantifier l'efficacité des différents moteurs de la pédogenèse actuelle, toute une série de dispositifs ont été mis en batterie pour chiffrer les entrées et les sorties de cette "boîte noire" que constitue le sol en évolution dans le milieu naturel ou cultivé.

Dans cette seconde partie, nous voudrions résumer, à titre d'exemple, les principaux résultats obtenus par la méthode des bilans en deux stations situées dans des paysages radicalement différents : la première est située sur des sols ferrallitiques en zone de forêt dense subéquatoriale tandis que la deuxième se trouve sur un long glacis de sols ferrugineux tropicaux sous savane soudano-sahélienne.

Le problème initialement posé est notamment, d'expliquer pourquoi bon nombre de sols tropicaux présentent en surface des horizons appauvris en particules fines (argile + limons fins = 0 à 20 microns) sans qu'il soit possible de mettre en évidence une accumulation correspondante dans l'horizon B par rapport au matériau originel C : le ventre de la courbe texturale des sols lessivés classiques est peu développé ou inexistant (voir fig. 6).

Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène :

- 1) Sédimentations successives au cours de phases morphologiques différentes.
- 2) Destruction des réseaux argileux au contact des acides organiques composant l'humus.
- 3) Erosion en nappe sélective combinée à des remontées de terre par des agents homogénéisateurs.
- 4) Lessivage oblique des colloïdes des horizons A des sommets de toposéquence vers les sols de bas de pente.
- 5) Lessivage vertical dans le même profil mais suivi de dépôts diffus sur de grandes profondeurs.

L'hypothèse historique (n° 1) échappe à notre expérimentation mais les quatre autres seront discutées au cours de l'exposé des résultats des mesures effectuées sur le terrain pendant 8 ans.

1. Les conditions de l'expérimentation. (voir carte situation fig. 2)

La station expérimentale d'AZAGUIE est située en bordure de la forêt classée du TEKE à 40 kilomètres au Nord d'ABIDJAN (5°33' lat. Nord ; 4°03' long Ouest, 80 m. alt.). Le paysage est formé de collines convexes se raccordant par une courte concavité (sols colluviaux) aux bas fonds étroits et marécageux (voir fig. 7). Les interfluves sont courts (300 à 500 m.) et les pentes dépassent 14 %. La forêt dense humide à Diospyros et Manania reste verte toute l'année et une litière peu épaisse mais continue couvre le sol. Sur les versants, les sols sont ferrallitiques très désaturés remaniés et appauvris sur schiste chloriteux ; ils sont hydromorphes minéraux dans le bas-fond.

Les précipitations annuelles atteignent 1800 millimètres dont 800 mm sont concentrés en 2 ou 3 mois. L'évapotranspiration potentielle s'élève à 1350 mm dans l'année dont 1 à 3 mm par jour seulement en saison des pluies. L'humidité de l'air est voisine de 80 % toute l'année. Sous forêt, le profil se dessèche la saison sèche de 116 mm sur 1 mètre et 160 mm sur 2 mètres de profondeur : au - delà de 250 cm de profondeur l'humidité du sol ne varie quasi plus (BOIS, ROOSE 1978 ; HUTTEL 1971).

Le dispositif comprend 2 cases ERLO et 8 lysimètres répartis par moitié sur deux versants voisins, l'un sous forêt et l'autre sous une bananeraie irriguée et fertilisée.

La station de GONSE est située à 25 km à l'Est de OUAGADOUGOU (12°22' lat. N., 1°19' long W., 300 m. alt.). Le paysage granitique de la région est formé de buttes cuirassées, d'un court éboulis de cuirasse suivi d'un long glacis d'épandage gravillonnaire (voir fig. 8) ; le lit mineur du marigot à écoulement discontinu est encaissé et entouré d'une auréole de sols ocres - jaunes très érodés. Les interfluves sont très longs (3 à 5 km.) ; les dénivellations sont faibles et les pentes sont le plus souvent inférieures à 1 % sauf sur les talus des buttes cuirassées. La végétation est une savane arborée à Butyrospermum Parkii, Parkia biglobosa Combretum et épineux divers : elle est soumise aux feux de brousse précoces sauf sur notre parcelle où le tapis graminéen (Andropogon gayanus et Pennisetum) évolue rapidement en fonction de la date des feux de brousse.

En réalité, il existe toute une série d'associations végétales liées à la mosaïque de sols ferrugineux tropicaux variant quant à leur profondeur, leur hydromorphie et leur taux de gravillons. Les sols sont loin d'être entièrement couverts par la végétation : de larges plaques de sol battu par les pluies apparaissent entre les touffes. Les précipitations annuelles ne dépassent guère 600 à 800 mm par an dont un max. de 260 mm au mois d'août. L'évapotranspiration potentielle par contre est très forte (1900 mm/an) même en pleine saison des pluies (3 à 5 mm/jour). L'humidité de l'air est inférieure à 50 % pendant une bonne période de l'année si bien que le pouvoir évaporant de l'air est élevé. Un mois après la dernière pluie utile, le profil est complètement desséché et les herbes fanent sur pied. La réserve utile du sol atteint 150 mm sur 1 mètre de profondeur et 194 mm sur l'ensemble du profil (180 cm) : une cuirasse imperméable isole ce sol d'une épaisse zone d'altération sous-jacente. Pourtant les arbres gardent des touffes de feuilles vertes durant toute la saison sèche et reverdissent plus complètement avant le retour des pluies. Le dispositif comprend une case ERLO, trois lysimètres et 8 parcelles de 240 à 400 m² pour suivre l'évolution des populations de termitières sous une savane arborée à épineux. A moins de dix km. de GONSE, le C.T.F.T. a mesuré l'érosion sur 5 parcelles cultivées au lieu dit GAMPELA.

2. Les résultats concernant la destruction des argiles.

Pour expliquer la diminution des teneurs en argile des horizons superficiels de certains sols ferrallitiques de GUYANE, LELONG (1969) fait appel à la destruction de la kaolinite dans des conditions de forte acidité en relation avec la présence d'acides organiques (humus) : le développement de gibbsite dans l'horizon B de ces sols indique en effet une hydrolyse de l'argile.

Dans les eaux de drainage d'AZAGUIE et de GONSE, on trouve effectivement (voir tableau 1) 4 à 6 ppm de silice mais très peu d'alumine (0,1 à 0,3 ppm d'Al₂O₃). L'alumine libre devrait donc s'accumuler dans l'horizon superficiel, ce qui n'est pas le cas : le rapport moléculaire SiO₂/Al₂O₃ reste voisin de 2. Dans ces deux stations sous végétation naturelle les eaux sont d'ailleurs beaucoup moins acides (pH 5 à 7) qu'en GUYANE. La silice des eaux de drainage trouve son origine dans la minéralisation de la litière (30 à 200 kg/ha/an de SiO₂) et dans la solubilisation lente des grains de quartz qui forment plus de 80 % de la masse du sol.

Tableau 1. Teneurs en SiO_2 et Al_2O_3 des eaux naturelles recueillies à GONSE et AZAGUIE.

	GONSE		AZAGUIE	
	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3
Pluie *	0,64 *	0,04 *	0,52 *	0,04 *
Ruissellement	3,9	0,08	4	0,23
Drainage superficiel	4,4	0,30	5,4	0,24
Drainage profond	6,5	0,06	5,6	0,27
Nappe *	35,6 *	0,01	8,3 *	0,04 *

* Les eaux de pluie et de nappe ont été prélevées à ADIOPODOUME et à SARIA.

3. Les résultats concernant l'érosion et les remontées par la mésafaune.

A AZAGUIE, l'érosion mesurée sur parcelles s'est stabilisée autour de 150 kg/ha/an sous bananeraie dont 80 à 90 % de particules fines en suspension stable dans les eaux de ruissellement. Cette érosion en nappe décape lentement l'horizon superficiel mais surtout prélève sélectivement les particules fines. Ce processus d'appauvrissement en fines serait vite bloqué par l'apparition d'un voile sableux (mulch protecteur) si des agents d'homogénéisation (labour ou vers de terre; termites, fourmis, etc) ne ramenaient sans cesse en surface des particules fines puisées dans les horizons profonds plus argileux. Dans la forêt du TEKE les vers de terre ont rejeté plus de 50 t/ha/an de terre fine (turricules) au-dessus de la litière (ROOSE, 1976). D'après les études de LAVELLE (1975) dans la savane de LAMTO, le poids de terre passant chaque année par le tube digestif des vers de terre atteindrait 800 t/ha/an alors qu'à peine 20 t/ha/an étaient rejetées à la surface du sol (turricules).

Autour de OUAGADOUGOU, l'érosion varie autour de 150 kg/ha/an sous une savane arborée soumise aux feux précoces et de 1 à 16 t/ha/an sous cultures vivrières. Le relief étant extrêmement plat, l'érosion y est faible sous la savane mais encore plus sélective vis-à-vis des particules fines que dans la zone ferrallitique. A GONSE, ce sont des termites moissonneuses (*Trinervitermes geminatus*) qui remontent de la terre fine à la surface du sol : ces remontées ont été estimées à 1200 kg/ha/an pour faire face à l'érosion des nids exposés aux intempéries et aux besoins en constructions nouvelles (ROOSE 1976). Il faudrait encore y ajouter les galeries temporaires construites par diverses espèces à la surface du sol et des arbres pour se protéger du soleil pendant leurs expéditions de collecte de cellulose.

Après abandon des nids par les termites, ces monticules se désagrègent petit à petit (10 à 30 % de perte de poids par an) sous la battance des pluies : les particules fines sont évacuées en suspension dans les eaux de ruissellement tandis que les sables forment des auréoles autour des vieux nids. Dans ces deux cas, l'agent homogénéisateur puise à la limite des horizons B des matériaux riches en fines, les remonte à la surface et les expose aux intempéries. L'érosion dissocie alors les particules fines facilement emportées par le ruissellement en nappe, des sables qui s'accumulent et sont remélangés avec l'horizon humifère. Le rôle de la mésosofaune est donc fondamental : permettre l'évolution et l'approfondissement des horizons appauvris qu'il brasse continuellement.

4. Les résultats concernant le lessivage oblique et vertical.

Dans les stations étudiées, le lessivage oblique ne s'est pas manifesté comme un moteur important des transports de matières : les lames drainées n'ont guère dépassé 1 à 26 mm soit 0,2 % du bilan hydrique annuel. Par contre, la mesure de la charge solide des eaux de drainage oblique dans les horizons appauvris en fines nous permet d'évaluer le lessivage de ces particules par les eaux de percolation traversant ces horizons.

Tableau 2. Estimation du lessivage et de l'érosion sélective.

	Turbidité (mgr/l)			Volume drainage (mm)		Lessivage vertical kg/ha/an	Erosion sélective kg/ha/an
	Ruiss.	Drain. superf.	Drain. profond	oblique	vertical		
GONSE Savane arborée	250	100	200	0,4	68	68	84 (savane) 4000 (cult.)
AZAGUIE forêt dense bananeraie	700	55	66	3	515	283	75 820
	900	60	31	26	630	378	

En multipliant la charge solide moyenne observée dans les eaux percolant à travers les horizons appauvris, par le volume du drainage vertical (tableaux 2) on obtient des lessivages de l'ordre de 68 - 283 et 378 kg/ha/an d'argile + limons fins respectivement sous la savane de GONSE, la forêt et la bananeraie d'AZAGUIE.

Par ailleurs, la part de l'appauvrissement imputable à l'érosion sélective peut se calculer en soustrayant les teneurs en fines de l'horizon superficiel du sol de celles des terres érodées :

$$[\text{Erosion sélective (kg/ha/an)} = (\text{teneur A+L terres érodées} - \text{A+L sol en place}) \times \text{poids érosion}]$$

On peut ainsi estimer l'érosion sélective à 84 kg/ha/an sous la savane de GONSE et 75 kg/ha/an sous la forêt du TEKE. Sous culture, l'érosion sélective est 10 à 50 fois supérieure (820 kg sous bananeraie et de 1000 à 20.000 kg/ha/an sous différentes cultures vivrières). (ROOSE, 1973).

En milieu ferrallitique forestier, le drainage vertical est très abondant, il entraîne la lixiviation des bases (sols très désaturés) et le lessivage vertical des particules fines des horizons A. Ces fines se déposent progressivement sur l'ensemble de l'épais manteau d'altération ou s'échappent du versant dans les eaux de nappe (ROOSE, 1972).

Dans la savane de GONSE par contre le lessivage vertical n'est plus le moteur dominant : dans le milieu naturel et à fortiori sous culture, les mouvements obliques de matières en suspension dans les eaux de ruissellement prennent de l'ampleur.

Sous culture, la charge solide des eaux de percolation augmente légèrement mais l'érosion sélective s'accélère considérablement tant que l'érosion ne devient pas décapante (érosion en rigole et en ravine). SIBAND (1972) a bien montré en Casamance la diminution des teneurs en argile et limons fins des horizons superficiels des champs cultivés depuis des périodes croissant de 1 à plus de 50 ans.

5. CONCLUSIONS

Il n'entre pas dans notre intention de nier la possibilité d'une mise en place des différents horizons durant des cycles géomorphologiques passés. Cependant l'ensemble des données accumulées sur ces parcelles nous permettent de mieux saisir l'orientation de l'évolution actuelle de ces sols sous végétation naturelle ou cultivée, en milieu tropical sec ou humide.

En milieu forestier subéquatorial, les sols ferrallitiques sont perméables et fixent mal les cations, les pluies sont intenses et les mouvements verticaux des eaux de drainage entraînent une lixiviation des bases et un lessivage vertical des argiles très poussés. Un réseau hydrographique très dense s'enfonce profondément dans la couverture d'altération meuble et donne au modelé sa forme en demi-orange très caractéristique. En milieu savanique soudanais par contre, les sols ferrugineux tropicaux sont peu perméables et sensibles à la battance des pluies, les précipitations sont moins importantes et le pouvoir évaporant de l'air reste élevé toute l'année : les mouvements d'eau, de solutions et de solides à la surface du sol deviennent dominants. Le décapage des versants par ruissellement entraîne la formation de longs glacis à pente faible.

En zone tropicale, la mise en culture entraîne un risque élevé d'érosion en nappe qui arrache sélectivement les particules fines, les matières organiques et les nutriments. Les phénomènes d'appauvrissement sont donc accélérés sous culture et très répandus en AFRIQUE de l'Ouest du fait des traditions de culture itinérante ainsi que de la forte densité d'agents d'homogénéisation du sol (travail du sol par l'homme, les termites, les vers, les fourmis, etc...). Le rôle de la mésofaune et de l'homme est donc fondamental car il permet l'évolution et l'épaississement des horizons appauvris.

Au rythme actuel, un à dix millénaires sont nécessaires pour expliquer l'appauvrissement observé sous végétation naturelle : sous culture un à dix siècles suffisent. C'est dire l'importance de l'érosion sélective sur les transports actuels de matières qui ne peuvent se développer sans l'action de l'homme et de la mésofaune.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer de lui avoir confié ce programme de recherche et ses collègues des instituts du G.E.R.D.A.T. (en particulier Mrs GODEFROY et BIROT) de l'avoir aidé sur le terrain à collecter les données.

Adresse actuelle : E. ROOSE, Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université d'ORLEANS. 45045 ORLEANS Cedex FRANCE.

BIBLIOGRAPHIE DES DEUX COMMUNICATIONS

- ASSELIN, (J.), VALENTIN, (C.), (1977) : Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 34 p multigr.
- AUBERT, (G.), BOULAIN, (J.), (1967) : La Pédologie. - PUF, COLL. Que sais-je ? n°352
- AUDRY, (P.), et alt. (1973) : Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. - in Bull. Groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols de l'O.R.S.T.O.M. n°2.
- AVENARD, (J.M.), ROOSE, (E.J.), (1972) : Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en COTE d'IVOIRE. O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 25 p multigr.
- BERNHARD, (F.), (1970) : Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de COTE d'IVOIRE. - OECOL. Plant., 5, 247-266.
- BERTRAND, (A.R.), PARR, (J.F.), (1960) : Développement of a portable sprinkling infiltrometer. - 7 th Intern. Congrès Soil Sci., Madison, vol. 4 n°4 p 433-440.
- BIROT, (P.), (1973) : Géographie physique générale de la zone intertropicale. - Les cours de Sorbonne. C.D.U., PARIS 280 p.
- BLIC, (Ph. de), (1976) : Le comportement de sols ferrallitiques de COTE d'IVOIRE après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu naturel. - Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol., 14,2, 113-130.
- BOCQUIER, (G.), (1971) : Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du TCHAD. Interprétation biogéodynamique. - Thèse Sc. Nat. STRASBOURG, Mémoire O.R.S.T.O.M. PARIS n° 62, 351 p.
- BOCQUIER, (G.), MILLOT, (G.), RUELLAN, (A.), (1974) : Differentiation pédologique et géochimique dans des paysages africains, tropicaux et méditerranéens. La pédogenèse latérale remontante. - C.R. 10ème Congrès Soc. Int. Sci. Sol MOSCOU vol 6, 226-233.
- BOIS, (J.F.), ROOSE, (E.J.), (1978) : Quelques réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique forestier de basse COTE d'IVOIRE. - Cah. O.R.S.T.O.M. Sér. Hydrol. 1978 n°4. (sous presse).
- BOULET, (R.), (1975) : Toposéquences de sols tropicaux en HAUTE-VOLTA. Equilibres dynamiques et bioclimats. - Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 13,1.
- BOULET, (R.), BRUGIERE, (J.M.), HUMBEL, (F.X.), (1978) : Relations entre caractères hydrodynamiques et organisation des systèmes de sols de GUYANE française septentrionale. - O.R.S.T.O.M. CAYENNE, 34 p multigr.
- BOURGES, (J.), FLORET, (C.), PONTANIER, (R.), (1973) : Etude d'une toposéquence type du sud Tunisien. DJEBEL DISCA- Campagne 1972-73. - O.R.S.T.O.M. TUNIS 43 p multigr.
- BOUYER, (S.), (1959) : Etude de l'évolution du sol dans un secteur de modernisation agricole au SENEGAL. - C.C.T.A. 3eme Conf. Intern. Sols DALABA, 2, 841-850.

- ZHARREAU, (C.), FAUCK, (R.), (1970) : Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de SEFA. - Agron. Trop. 25,2, 151-191.
- DABIN, (B.), (1963) : Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. - Cah. ORSTOM sér. Pédol. 1, p 27-42.
- DRESCH, (J.), (1966) : Les paysages tropicaux humides. - Géogr. gén. encyclop. La Pleiade, PARIS p 609-711.
- DUCHAUFOUR, (Ph.), (1968) : L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. - Masson éd. PARIS 94 p.
- FAUCK, (R.), MOUREAUX, (C.), THOMANN, (C.) (1969) : Bilans de l'évolution des sols à SEFA après 15 années de culture continue. - Agron. Trop. 24,3, 263-301.
- FOURNIER, (F.), (1954) : La parcelle expérimentale. Méthode d'étude de la conservation du sol, de l'érosion et du ruissellement. - Rapport Mission O-E-C-E aux U.S.A. O.R.S.T.O.M. PARIS
- HARROLD, (L.L.), DREIBELBIS, (F.R.), (1958) : Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters : 1944-1955. - U.S.D.A., OHIO Agric. Exp. Station Techn. bull. n° 1179, 166 p.
- idem (1967) : 1956-1962 Techn. bull. n° 1367, 124 p.
- HEUSCH, (B.), (1970) : L'érosion du PRE-RIF. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. - in. Ann. rec. Forestière au MAROC, t 12, p 9-176.
- HEUSCH, (B.), (1971) : Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. - C.R. Sci. Nat. et Phys. du MAROC, p. 41-54.
- HUTTEL, (CH.), (1971) : Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de basse COTE d'IVOIRE. - AIEA/SM - 151/46. VIENNE 12 p.
- KONKE, (H.), DREIBELBIS, (F.R.), DAVIDSON, (J.M), (1940) : A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance. - U.S.D.A. Misc. publ. 372 WASHINGTON D.C.
- LATHAM, (M.), (1971) : Rôle du facteur sol dans le développement du cotonnier en COTE d'IVOIRE. - Cah. O.R.S.T.O.M. Sér. Pédol., 9,1, 29-42.
- LAVELLE, (P.), (1975) : Consommation annuelle de terre par une population naturelle de vers de terre (*Millsonia anomala* Omodeo) dans la savane de LAMTO (COTE d'IVOIRE). - Rev. Ecol. Biol. Sol. 12, 1, p 11 à 24.
- LEBUANEC, (B.), (1972) : Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du centre COTE d'IVOIRE. - Agron. Trop. 27, 11, 1191-1211.
- LELONG, (F.), (1969) : Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (GUYANE française). - Thèse Fac. Sci. NANCY n° 14, 188 p.
- ROOSE, (E.J), (1967) : Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au SENEGAL. - Agron. Trop. 22,2, 123-152.

- ROOSE, (E.J), (1968) : Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. - Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol. 6,2,235-249.
- ROOSE, (E.J), des TUREAUX, (P.), (1970) : Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. - Agron. Trop. 25, 12, p 1089-1087.
- ROOSE, (E.J), (1971) : Influence des modifications du milieu naturel sur l'érosion, le bilan hydrique et chimique, suite à la mise en culture sous climat tropical. O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 22 p multigr.
- ROOSE, (E.J), (1972) : Contribution à l'étude de l'appauvrissement de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux situés entre ABIDJAN et OUAGADOUGOU par l'utilisation de méthodes expérimentales de terrain. - Bull liaison Thème A O.R.S.T.O.M. n°1, p 19-41.
- ROOSE, (E.J), (1973) : Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse COTE d'IVOIRE. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. - O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 125 p multigr.
- Thèse doct. ing. Fac. Sci. ABIDJAN n° 20.
- ROOSE, (E.J), (1976) : Contribution à l'étude de l'influence de la mésosofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. - O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 56 p multigr.
- ROOSE, (E.J), (1976) : Use of the Universal soil loss Equation to predict erosion in West Africa. - in S.S.S.A. Special publication n° 21, 60-74.
- ROOSE, (E.J), GODEFROY, (J.), (1977) : Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse COTE d'IVOIRE. - Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol., 15, 3, p 409-436.
- ROOSE, (E.J), (1977) : Erosion et ruissellement en AFRIQUE de l'Ouest, vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. - Travaux et Documents de l'O.R.S.T.O.M., n° 78, 108 p.
- ROOSE, (E.J), (1978) : Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous une savane arborée du plateau MOSSI. (HAUTE-VOLTA). - O.R.S.T.O.M. PARIS 121 p multigr.
- ROUGERI, (G.), (1960) : Le façonnement actuel des modelés en COTE d'IVOIRE forestière. Mémoire IFAN n° 58, 542 p.
- SEGALEN, (P.), (1969) : Le remaniement des sols et la mise en place de la stone-line en AFRIQUE. - Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol. 7,1, 113-127.
- SIBAND, (P.), (1972) : Evolution des sols sous culture traditionnelle en Haute CASAMANCE. - Agron. Trop. 27,5, 574-591.
- SWANSON, (N.P), (1965) : Rotating-boom rainfall simulator. - Trans. Amér. Soc. Agric. Eng. 8, 71-72.
- VALENTIN, (C.), (1978) : Problèmes méthodologiques liés à la simulation de pluies. - Application à l'étude de l'érodibilité des sols. O.R.S.T.O.M. ABIDJAN 11 p multigr. Colloque STRASBOURG 20-23/9/78.

VUILLAUME, (G.), (1968) : Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de KountKouzout (NIGER). - Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol. 5,2, 33-56.

WISCHMEIER, (W.H.), SMITH, (D.D.), (1960) : A Universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning 7 th. Intern. Congres. Soil Sci., vol. 1, 418-425.