

Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire)

Christian VALENTIN et Jean-Louis JANEAU

Laboratoire de Pédologie expérimentale, ORSTOM, BP V-51, Abidjan, Côte d'Ivoire

RÉSUMÉ

Les risques de dégradation structurale superficielle des sols d'un petit bassin-versant de savane humide ont été évalués sous simulation de pluie. Parmi les paramètres les plus pertinents, on relève le taux de matière organique, l'indice d'instabilité structurale et la limite de liquidité. Cependant, ces deux tests de comportement n'ont pas de valeur universelle : leur domaine de validité dépend de l'état hydrique initial. Ainsi, le test d'instabilité structurale de HENIN et MONNIER semble plutôt adapté aux conditions sèches, la limite de liquidité d'Atterberg aux conditions humides. Les indices de couleur, expression des processus pédogénétiques, s'avèrent des instruments précieux pour la prévision du fonctionnement actuel des sols de la savane humide. Les mesures menées sur des jachères d'âges différents suggèrent que, pour des sols rouges ferrallitiques, cultivés manuellement et non pâturés ensuite, une période de 10 ans correspond à la durée minimale au rétablissement de la stabilité structurale et de l'infiltrabilité initiales.

MOTS-CLÉS : Encroûtement superficiel — Instabilité structurale — Limites d'Atterberg — Couleur des sols — Jachère — Simulation de pluie — Ruissellement — Détachabilité — Savane humide — Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

SURFACE CRUSTING IN WET SAVANNAH (CÔTE D'IVOIRE)

The stability of soil aggregates to impacting water drops is now regarded as a key parameter required in any soil erodibility assessment. The objective of the present investigation is to evaluate the applicability of various stability indices to wet savannah soils as related with actual crusting determined in the field under rainfall simulation.

Experimentation was carried out on 1 m² plots in a small watershed of north-west Côte d'Ivoire : 14 plots were previously under natural conditions, 6 under fallow. Two rainfall events were simulated on a seedbed preparation under dry and wet conditions. The hydrological variables included preponding rainfall, steady infiltration rate, runoff ratio and soil losses. Stepwise regression analyses were conducted to develop relationships between these variables and three types of indices :

*— soil properties : mechanical analysis, organic matter and iron content, as well as structural instability (HENIN and MONNIER, 1956) and consistency indices (Atterberg limits and C5-10 index, DE PLOEY and MÜCHER, 1981),
— pedological features : the colour parameters and the location in the catena,
— morphological indices based on monitoring the smallest aggregate not yet incorporated in the structural crust (BOIFFIN, 1984).*

The preponding rainfall is positively correlated with organic matter content. But no unique index may be used to predict crusting since processes are interrelated with the antecedent moisture conditions and the rainfall features. Thus, the use of the index of HENIN and MONNIER should be restricted to the assessment of crustability under dry conditions whereas the Atterberg's liquidity limit is better adapted to wet conditions. Moreover, the velocity

of crusting processes is not related to the hydrological properties of the resulting seal. The colour parameters can be used as valuable indices of crustability. Along the catena, the red upperhill ferrallitic soils, as well as the yellow thoroughly leached downhill soils are less prone to crusting than the mid-slope ochric ferruginous-like soils.

Tillage induces surface degradation, even under traditional conditions. However, in these red ferrallitic soils, manually tilled and then not submitted to grazing, structural stability and infiltrability are restored after a fallow period of about ten years.

KEY WORDS : Soil surface crusting — Stability index — Atterberg limits — Soil colour — Fallow — Runoff — Detachability — Wet savannah — Côte d'Ivoire.

RESUMEN

LOS RIESGOS DE DEGRADACIÓN DE ESTRUCTURA EN LA SUPERFICIE DE LOS SUELOS EN LA SABANA HÚMEDA

Se evaluaron bajo lluvias simuladas los riesgos de degradación de estructura en la superficie de los suelos de una pequeña cuenca hidrográfica en la sabana húmeda. Entre los parámetros más pertinentes, se nota la tasa de materia orgánica, el índice de inestabilidad estructural y el límite de liquidez. Sin embargo, esas dos pruebas de compartimiento no tienen ningún valor universal: su validez depende del contenido de agua inicial. Así, la prueba de inestabilidad estructural de HENIN y MONNIER parece ser más bien adaptada a las condiciones secas, y el límite de liquidez de ATTERBERG a las condiciones húmedas. Los índices de color que expresan los procesos pedogenéticos se revelan ser preciosos para prever la evolución actual de los suelos de la sabana húmeda. Las medidas efectuadas en barbechos de edad diferente sugieren que, en el caso de suelos rojos ferralíticos, cultivados manualmente y luego no pastoreados, un período de diez años corresponde a la duración mínima que es necesaria para restablecer la estabilidad estructural y la infiltrabilidad iniciales.

PALABRAS CLAVES : Incrustación superficial — Inestabilidad estructural — Límites de Atterberg — Color de los suelos — Barbecho — Simulación de lluvia — Escorrentía — Arranque — Sabana húmeda — Costa de Marfil.

INTRODUCTION

Entre la zone semi-aride peu productive et la frange côtière bientôt saturée, la savane humide détient, en Afrique de l'Ouest, plus d'un atout pour le développement : un climat favorable à la production agricole, une population demeurée faible, de vastes étendues inexploitées. Si la densité de son peuplement résulte davantage de causes historiques et sanitaires, maintenant jugulées, que de l'infertilité des sols, ceux-ci n'en présentent pas moins de sérieuses contraintes, principalement d'ordre physique (PIERI et MOREAU, 1987). A cet égard, à la fois cause et symptôme de dégradation, l'encroûtement superficiel constitue l'élément clef de la compréhension et de la prédiction de phénomènes aussi importants que les pertes à la levée (RUIZ FIGUEROA, 1983), le ruissellement (CASNAVE et VALENTIN, 1988) et l'érosion (ROOSE, 1980 ; COLLINET, 1988).

Comment estimer à partir des données pédologiques, les risques de dégradation structurale superficielle ? Plusieurs démarches, non exclusives l'une de l'autre, peuvent être adoptées ; au risque de les caricaturer, rappelons qu'elles s'inspirent, peu ou prou, des schémas suivants :

— Comme le comportement physique des sols dépend, en premier lieu, de ses constituants, l'analyse au laboratoire d'échantillons doit fournir de précieuses indications. C'est la voie *physico-chimique*.

— La couverture pédologique constitue une entité organisée dans l'espace et dans le temps. L'étude fine de ses différenciations et de ses processus de formation doit renseigner sur son évolution ultérieure. C'est la démarche *pédologique*.

— En l'état actuel de nos connaissances sur les facteurs et les processus de réorganisation, il n'est pas possible de faire l'économie de suivis *in situ*. C'est l'approche *expérimentale*.

Ces trois démarches ont été suivies pour répondre à notre objectif d'évaluer les risques d'encroûtement superficiel, consécutifs à la mise en culture de sols :

- considérés comme « naturels », c'est-à-dire non travaillés de mémoire d'homme,
- en jachère depuis un nombre variable d'années.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le site d'étude

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme

hydropédologique de recherche sur bassin-versant (Hyperbav), portant sur l'organisation des sols et le fonctionnement hydrique du bassin-versant de Booro-Borotou. Couvrant 136 ha, celui-ci appartient à la zone de savane humide ; il se trouve à 25 km au nord de la ville de Touba, dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Les précipitations, réparties d'avril à octobre, atteignent 1 360 mm, en moyenne annuelle.

Comme l'illustre la représentation d'une toposéquence type (fig. 1), cette région correspond, à bien des égards, à une zone charnière entre la forêt et la savane, entre les systèmes pédologiques des zones humides, et ceux des zones sèches. Développés sur granito-gneiss, roche mère la plus représentative du socle précambrien, les sols se différencient, en effet, selon plusieurs grands ensembles (FRITSCH, PLANCHON et BOA, 1987) :

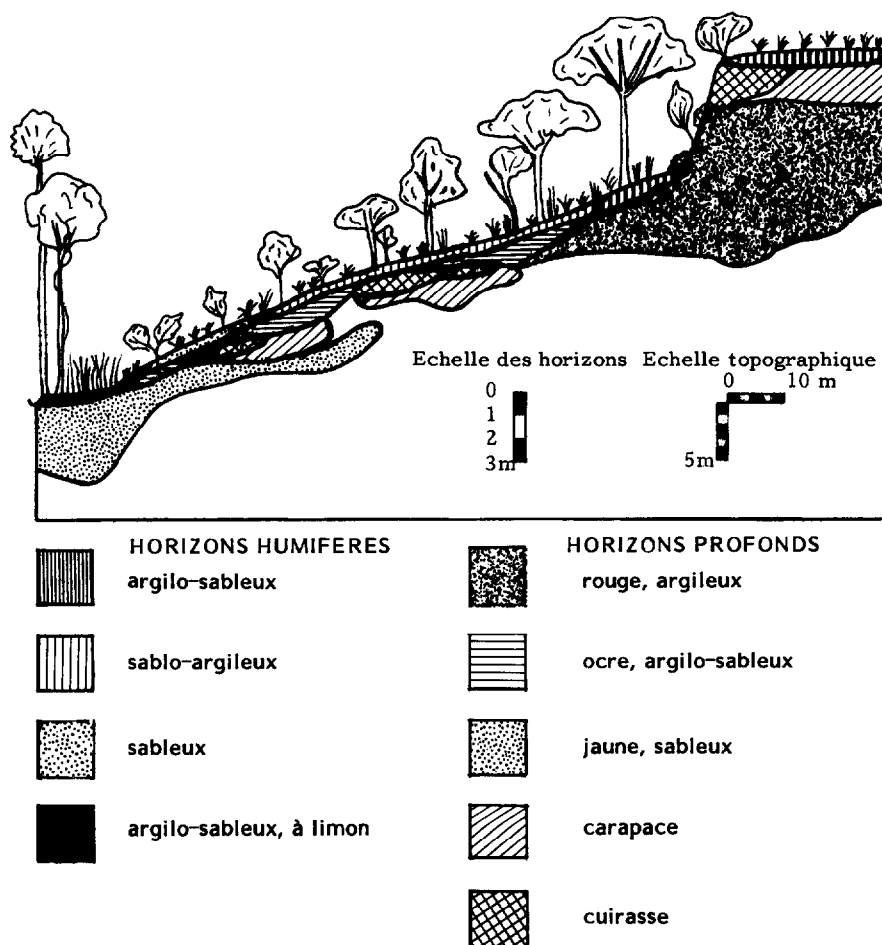


FIG. 1. — Distribution générale des sols et de la végétation le long d'une toposéquence type (schéma simplifié d'après FRITSCH, BOA et PLANCHON, 1987).

Sketch of soils and vegetation variation along the catena (simplified after FRITSCH, BOA and PLANCHON 1987).

— Un domaine ferrallitique qui comprend quatre petits plateaux reliques et leur piémont. Les cuirasses et carapaces, à faciès altéritique, se trouvent séparées de l'altérité par des horizons gravillonnaires et pédoturbés rouges, très riches en déjections de termites. Les sols de piémont, rouges (2,5 à 5 YR), profonds, à fortes teneurs

en fer et en argile, présentent une structure bien individualisée et une porosité élevée.

— Un versant à tendance ferrugineuse. Plus à l'aval, l'appauvrissement en fer et en argile se manifeste par un passage à des sols ocres (7,5 YR) à structure plus massive et à porosité réduite. A mi-versant, se sont

individualisées une carapace et une cuirasse discontinues que souligne une rupture de pente assez nette.

— Un bas-versant éluvié. L'appauvrissement se poursuit à l'aval par le passage à des sols sableux et blancs (10 YR). En outre, l'existence d'une nappe favorise une éluviation très marquée des horizons situés au-dessus de l'altérite, imperméabilisée par des argiles gonflantes de néoformation.

— Un bas-fond colluvio-alluvial. A l'aval du versant, des colluvions argileuses enrichies en limons, recouvrent les horizons sableux. Dans le bas-fond proprement dit, les matériaux sableux et argileux alternent au sein d'un ensemble complexe.

Sur cette organisation générale de la couverture pédologique, se décalque une distribution analogue des états de surface (PLANCHON, FRITSCH et VALENTIN, 1987 ; MITJA, 1987).

Alors qu'une végétation de savane herbeuse basse couvre l'essentiel des plateaux cuirassés, le haut de versant est occupé par des savanes boisées et arborées hautes. A l'aval, une savane arbustive basse est relayée par une savane herbeuse haute dont les limites recouvrent sensiblement celles de la zone d'affleurement de la nappe en fin de saison des pluies. Souvent bordée d'une savane boisée hydrophile, la forêt galerie, discontinue, est constituée d'espèces de forêt humide.

De même, les organisations pédologiques de surface reflètent assez bien la distribution générale des sols et de la végétation, dont, il est vrai, elles constituent l'interface. A la faveur de clairières, des pellicules se forment dès le haut des versants sur les sols rouges et se raccordent à des zones encroûtées plus vastes, situées sur les sols ocres à l'aval. Emboîté dans cet ensemble, se développe un système érosif qui met en jeu un ruissellement en nappe sur les sols encroûtés, et devient linéaire au niveau de protogriffes (orientation, dans le sens de la pente, du microrelief lié aux touffes d'herbes), puis de griffes et de ravines, parfois profondes de plusieurs mètres à la mi-versant. A l'aval, les croûtes à plusieurs micro-horizons, bien développées sous la savane arbustive, disparaissent, ainsi que les incisions linéaires. Cette « bande d'arrêt », où cesse le ruissellement, riche en colluvions superficielles sableuses, précède les colluvions plus limoneuses d'abord, plus argileuses ensuite, situées en aval. La savane herbeuse haute est le siège d'une très forte activité de vers. Sous la forêt galerie, comme sous les autres formations à litières (savanes boisée et arborée), les rares pellicules, à caractère fugace, se trouvent remaniées par la mésofaune du sol (termites, fourmis et vers).

Travaillés manuellement, les champs n'occupent, sur le bassin-versant, qu'une dizaine d'hectares. Bien qu'appartenant surtout aux sols rouges et bien structurés de haut de versant, leur surface n'en subit pas

moins d'importantes réorganisations superficielles, à l'origine d'une érosion non négligeable. Les surfaces des jachères de moins de sept ans se caractérisent, le plus souvent, par la présence de croûtes bien individualisées, d'autant que s'y concentrent préférentiellement les nids de *Trinervitermes*, termites fourrageurs qui favorisent la dégradation structurale superficielle (LEPAGE et TANO, 1986 ; JANEAU et VALENTIN, 1987).

Les méthodes

LES PARCELLES EXPÉRIMENTALES

Recherche d'une variabilité

Vingt parcelles de 1 m² ont été implantées pour y effectuer des observations et des mesures sous pluies simulées :

— 14 correspondent au milieu naturel. Elles ont été disposées selon deux demi-toposéquences de part et d'autre de la rupture de pente de mi-versant :

- parcelles nos 1 et 2 sur les sols rouges, nos 3, 4, 5 et 6 sur les sols ocres à l'amont,
- parcelles nos 7, 8, 9 et 10 sur les sols ocres, à l'aval, nos 11 et 12 sur les sols jaunes de bas de versant, nos 13 et 14 sur les colluvions de savane herbeuse haute.

— 6 appartiennent à des jachères de sols rouges (J1 à J6). Elles se différencient par leur âge : de 2 à 40 ans et la durée d'exploitation qui a précédé la mise en jachère : de 5 à 12 ans. Ces paramètres ont été déterminés après plusieurs enquêtes, recoupées par des documents officiels (MITJA, *comm. orale*, 1988).

Caractères de l'horizon travaillé

Le tableau I présente les caractéristiques granulométriques — dont la somme a été rapportée à 100 — ainsi que les taux de matière organique et de fer total de l'horizon travaillé sur 10 cm. Par ailleurs, du fait de son importance quant à l'identification des sols, nous avons pris en compte les caractères de couleur, définis selon le code Munsell : la couleur (ou gamme), « value » et chroma. Suivant les conseils de FRITSCH (*comm. orale*, 1988), nous avons également déterminé ces trois paramètres, après élimination de la matière organique à l'eau oxygénée (H₂O₂).

ANALYSE DE LA TAILLE DES PARTICULES

Instabilité structurale

Parmi les très nombreux tests d'instabilité structurale, nous avons sélectionné celui proposé par HENIN et MONNIER (1956) : il appartient à la routine de la plupart des laboratoires d'Afrique francophone. En outre, comme l'ont montré, au Nigeria, DE VLEESCHAUWER, LAL et DE BOODT (1978), il se classe comme le meilleur de 14 indices de l'érodibilité des sols tropicaux.

Par la suite, cet indice sera appelé « Instabilité structurale », ou plus simplement « Is », les agrégats stables

TABLEAU I

Principaux caractères physico-chimiques de l'horizon travaillé des parcelles étudiées

Physical and chemical properties of the tilled layers in the studied plots

Parcelle	Argile	Lf	Lg	SF	SG	MO	Fe
1	23,4	8,0	0,6	31,0	37,0	3,1	3,8
2	19,3	7,3	1,8	30,3	41,2	2,6	4,6
3	20,7	8,1	0,5	26,4	44,3	2,3	2,8
4	19,9	6,1	0,6	26,5	46,8	2,0	2,6
5	17,1	7,3	1,2	24,9	49,6	2,0	2,3
6	14,2	5,8	1,4	27,8	50,9	1,7	1,8
7	16,4	8,4	1,3	31,5	42,5	2,1	4,8
8	24,3	7,3	2,2	32,3	33,9	2,1	3,5
9	12,6	5,7	1,2	36,4	44,0	1,7	1,7
10	17,3	7,6	2,1	35,0	38,0	2,4	3,0
11	12,4	8,5	1,2	28,1	49,8	2,8	2,5
12	12,2	9,4	0,9	27,4	50,1	2,4	1,7
13	15,6	11,6	1,7	24,0	47,2	3,5	1,6
14	29,2	8,8	5,6	34,2	22,2	6,8	1,7
J1	20,4	7,9	2,6	31,3	37,7	2,5	4,7
J2	23,3	9,0	2,5	30,5	34,7	2,6	4,7
J3	13,3	5,5	1,5	27,5	52,2	1,9	2,1
J4	18,3	4,7	1,0	28,7	47,3	1,4	2,4
J5	16,8	4,8	0,6	26,7	51,1	1,4	2,6
J6	14,9	5,7	0,8	30,6	48,0	4,0	5,0

à l'eau, à l'alcool et au benzène : « AGE », « AGA », et « AGB ».

Consistance

Comme les risques d'encroûtement dépendent de la cohésion des agrégats, les tests de consistance, longtemps négligés, trouvent un regain d'intérêt : DE PLOEY et MÜCHER (1981) préconisent l'utilisation d'un indice, appelé C_{5-10} , fondé sur la détermination de la limite de liquidité d'Atterberg. Il est égal à la différence des humidités W_5 et W_{10} , correspondant à 5 et 10 coups sur la courbe établie lors du test. La limite de liquidité, désignée par LL, est, par définition, l'humidité W_{25} . La limite d'adhésivité, LA, a également été prise en compte.

L'ETUDE IN SITU DE LA DYNAMIQUE STRUCTURALE

Protocole expérimental

1. Préparation du sol

Afin de simuler un lit de semence, chaque parcelle a subi un travail du sol manuel sur une profondeur de 10 cm, puis a été aplaniée. Très largement utilisé, ce traitement permet de mesurer la détachabilité pour un travail du sol standardisé. En vue de limiter les facteurs de variation, une pente uniforme de 4 % a été donnée à chaque parcelle. La normalisation du traitement n'implique pas cependant l'obtention du même pourcentage d'agrégats et de la même distribution de leur taille initiale. En effet, de telles conditions s'éloigneraient

abusivement de celles du travail manuel pour lequel l'état structural initial du lit de semence demeure contingent du type de sol.

2. Les pluies simulées

L'élaboration d'un protocole de pluies simulées procède de choix délicats. En effet, l'encroûtement dépend, dans une large mesure, non seulement des caractéristiques des pluies mais des états hydriques initiaux. Afin de reproduire une large gamme de situations, deux pluies ont été simulées à l'aide du dispositif mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978) :

— la première correspond à une averse modérée de début de saison des pluies, à l'époque des semis. Pour l'ensemble des parcelles, l'état hydrique est identique : celui de fin de saison sèche. Tant son intensité — 60 mm/h — que sa durée — 45 minutes — la situent parmi les pluies de récurrence annuelle (DAVOINE, 1988) ;

— la seconde a été simulée une heure après la précédente. Elle tend à reproduire les conditions d'un orage de saison des pluies : état hydrique initial très humide et intensité élevée (120 mm/h). D'une durée d'une demi-heure, cette pluie a une récurrence annuelle. Pour les deux parcelles de bas de versant, la durée de la pluie a été portée à une heure — récurrence de 20 ans (DAVOINE, 1988).

3. Variables prises en compte

Pour chaque pluie, les principaux paramètres d'hydrodynamique superficielle ont été déterminés (LAF-FORGUE, 1977) :

- Pi (mm) : pluie d'imbibition. Il s'agit de la hauteur de pluie nécessaire à l'apparition du ruissellement ;
- Fn (mm/h) : intensité minimale d'infiltration stabilisée ;
- Kr (%) : coefficient de ruissellement égal au rapport entre la lame ruisselée (mm) et la hauteur de pluie (mm) ;
- Pt (g/m²) : pertes en terres (en suspension et recueillies sur le canal).

Suivi de la formation des croûtes

L'état structural initial, ainsi que les états après chaque pluie, ont été caractérisés à l'aide du dispositif de points quadrats. Les principaux caractères de la distribution du diamètre des agrégats ont été déterminés : minimum et maximum (D_{max}), médiane, premier et troisième quartiles, interquartile. De même, la nature du micro-horizon supérieur a été identifiée tous les 10 cm : agrégat libre, agrégat inclus dans la croûte, ou croûte.

Par ailleurs, le diamètre du plus petit agrégat encore libre, c'est-à-dire non inclus dans la croûte, a été relevé toutes les minutes. Cet indicateur morphologique,

D_{\min} , s'avère particulièrement pertinent pour suivre le pourcentage de surface occupée par la croûte (BOIFFIN, 1984). Comme l'augmentation de D_{\min} s'ajuste selon une droite, en fonction tout aussi bien du cumul des pluies que des énergies cinétiques, il est possible de préciser, dans les deux cas, la pente et l'ordonnée à l'origine. Ces pentes permettent d'apprécier la sensibilité à l'encroûtement, sans influence notable des conditions structurales initiales (BOIFFIN et MONNIER, 1986). A ces paramètres, il nous a paru utile d'ajouter la *pluie et l'énergie critiques*, seuils au-delà desquels aucun agrégat libre ne subsiste.

LES OBSERVATIONS MICROMORPHOLOGIQUES

Sur chaque parcelle, trois échantillons ont été prélevés en vue de la confection de lames minces : avant les pluies, pour caractériser l'état initial, et après les pluies, à l'amont et à l'aval de la parcelle. L'épaisseur moyenne des croûtes a été mesurée ainsi que la profondeur du tassement dû aux pluies. Il est possible, en effet, d'identifier nettement, sous les croûtes, une zone à macro-porosité réduite, bien distincte de la structure conservée de l'horizon travaillé sous-jacent.

Les traitements statistiques

En vue d'un traitement statistique des données, trois populations ont été distinguées. Elles regroupent :

- indistinctement les 20 parcelles,
- les 6 parcelles de jachère,
- les 14 parcelles du milieu naturel.

Deux grands types de variables ont été considérées :

— Descriptives, ou « explicatives ». Il s'agit de l'ensemble des indices considérés. Trois groupes ont été distingués :

- les paramètres analytiques : données de l'analyse granulométrique, taux de matière organique et de fer total, ainsi que leurs combinaisons ou leurs rapports $A + L_f$, $L_f + L_g$, $SF + S_g$, $(L_f + L_g)/A$ et MO/A ,
- les paramètres liés aux tests de laboratoire : I_s , $AGA-S_g$, $AGB-S_g$, $AGE-S_g$, W_5 , W_{10} , C_{5-10} , LL , et LA ,
- les indicateurs morphologiques : les paramètres de couleur, avant et après élimination de la matière organique.

— Expliquées. Cet ensemble comprend :

- les paramètres morphologiques liés à la formation de la croûte,
- les différentes variables hydrodynamiques.

Le traitement des données a fait appel à :

- l'analyse de la matrice de corrélation ; celle-ci a permis de réduire le nombre de variables pertinentes ;
- la régression multiple à sélection itérative des

variables significatives. Elle permet une hiérarchisation des paramètres établie selon le coefficient de détermination r^2 , pourcentage de variabilité expliquée par la régression. Lors de la présentation des résultats, nous ne retiendrons que les variables pour lesquelles la régression est significative au seuil de 95 %. Nous les ferons précéder du signe dont elles sont affectées dans les équations de régression.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Présentation générale des variables expliquées

A la fin des deux pluies, aucun agrégat libre ne subsistait à la surface des parcelles. Toutes ont produit du ruissellement.

Toutefois, au cours de la première averse, la pluie critique n'a été atteinte que pour 3 parcelles du milieu naturel : nos 12, 11, 8 et une parcelle de jachère : J 6. Ces parcelles ne se distinguent des autres que par un paramètre de couleur : la « valeur » naturelle, inférieure à 5. De même, la pluie d'imbibition n'a été dépassée lors de la première pluie que sur 4 parcelles du milieu naturel : Nos 13, 9, 14 et 8 et pour 3 parcelles de jachère : J3, J6 et J5. Les parcelles naturelles concernées se singularisent par les taux de limons et de matière organique les plus faibles : $L_f + L_g < 8,5 \%$ et $MO < 2.1 \%$.

Le tableau II présente les principaux paramètres statistiques relatifs aux variables expliquées :

- la pluie d'imbibition, la pluie critique, la pente de D_{\min} , déterminées sur l'ensemble des averses,
- l'intensité minimale d'infiltration (F_n), le coefficient de ruissellement (K_r), et les pertes en terres (P_t), mesurées pour la deuxième pluie.

Dans l'ensemble, les parcelles du milieu naturel présentent une meilleure résistance à l'encroûtement que pour les sols :

- de la même zone climatique, développés sur des matériaux plus limoneux, sur schistes (POSS et VALENTIN, 1983) et sur alluvions (VALENTIN et RUIZ FIGUERDA, 1986) ;
- des zones plus arides. Si les éléments de comparaison font défaut pour la pluie critique et la pente de D_{\min} , il n'en est pas de même pour la pluie d'imbibition. Des protocoles identiques conduisent en zone sahélienne, à des pluies d'imbibition plus faibles : $25 \text{ mm} < P_i < 30 \text{ mm}$, selon CASNAVE et VALENTIN (1988).

Le minimum de pluie d'imbibition enregistrée au cours de cette étude, 18 mm, correspond à la jachère la plus dégradée. La mise en culture induit, en effet, un encroûtement comparable à celui observé en zone

TABLEAU II
Principaux paramètres de distribution des variables étudiées
Main descriptive parameters of the studied variables

Variabiles	Minimum	Maximum	Médiane	1 ^{er} quartile	2 ^e quartile
Pluie critique (mm)	28	149	59	51	73
Pente de D _{min}	0,22	1,34	0,67	0,51	0,87
Pluie d'imbibition (mm)	18	104	48,6	38,5	55
Kr (%)	0,4	57	17,1	6	34,85
Fn (mm/h)	40	120	92,5	64	108
Pertes en terres (g/m ²)	0	279	60,55	2,8	128,45

plus sèche : l'infiltrabilité des parcelles cultivées sur les sols rouges de ce bassin (VALENTIN et CAMARA, 1988) peut être estimée, avec une précision satisfaisante, à partir de la typologie des surfaces sahéliennes (CASENAVE et VALENTIN, 1988). L'encroûtement des champs présenterait donc une certaine azonalité, au moins à l'échelle des savanes de l'Afrique de l'Ouest.

Réduction du nombre de variables

L'étude de la matrice de corrélation a permis d'éliminer des traitements :

- les paramètres de l'énergie critique, fortement corrélés à ceux de la pluie critique ;
- la limite d'adhésivité, W5 et W10, paramètres très liés à la limite de liquidité.

Recherche d'indices d'encroûtement

LES DONNÉES PHYSICO-CHEMIQUES

L'analyse granulométrique d'un sol fournit à elle seule des indications pertinentes sur ses risques d'encroûtement : 76 % de la variabilité de la pluie d'imbibition se trouvent expliqués par les taux de sables et d'argile.

Le taux de matière organique intervient également sur la pluie d'imbibition ($r^2 = 50\%$). Agent de non-mouillabilité, surtout après une longue période sèche (SEBILLOTTE, 1968 ; BOIFFIN, 1976), elle limite les risques d'éclatement lors de l'humectation et donc la vitesse de formation des croûtes. Ces résultats confirment ceux de MONNIER (1965) : la matière organique n'influence la stabilité structurale de façon sensible qu'au-delà d'une valeur seuil du rapport MO/A, égale à 7 %. Pour les 20 parcelles, ce rapport varie entre 7,7 et 27 % avec une moyenne de 14,4 %. Ce rôle de la matière organique est à rapprocher des différences, déjà

mentionnées, pour la pluie d'imbibition, avec les zones plus sèches où les taux excèdent rarement 1 %.

LES TESTS DE LABORATOIRE

Comprise entre 0,2 et 0,9, l'instabilité structurale (en moyenne de 0,6), classe les sols du bassin-versant parmi les plus stables. Toutefois, les taux élevés de sable grossier doivent tempérer ce diagnostic : les moyennes de AGE-Sg, AGA-Sg et de AGB-Sg ne sont respectivement que de 18,4 %, 24 % et de 6,6 %. De fait, l'instabilité structurale se révèle un médiocre prédicteur des variables hydrodynamiques (tabl. III). En revanche, le paramètre AGB-Sg extrait près de la moitié de la variabilité de la pluie d'imbibition, ce qui confirme l'influence positive de la matière organique. Il reste que les paramètres d'instabilité structurale ne permettent pas une prédiction plus précise des variables expliquées que les données physico-chimiques.

En meilleure place, la limite de liquidité explique plus des trois quarts de la pluie d'imbibition et plus de la moitié du coefficient de ruissellement. Associée à Is, elle permet d'extraire près des trois quarts du coefficient de ruissellement. Rappelons que l'essentiel de l'analyse porte sur les données de la deuxième pluie. Or, LE BISSONNAIS (1988) a montré qu'aux fortes humidités initiales, ce ne sont pas tant les phénomènes d'éclatement qui interviennent que ceux de désagrégation mécanique liés à la violence des chocs reçus — ici des gouttes de pluies — et à la cohésion des agrégats à l'état humide. Test de consistance mené dans des conditions expérimentales analogues, la détermination de la limite de liquidité, dès lors, s'avère, en conditions humides, un meilleur indice que l'instabilité structurale.

LES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES

Comme l'a précisé BOIFFIN (1984), la pente de D_{min}, qui traduit la vitesse de formation de la croûte, se révèle peu sensible à l'état structural initial du sol. Pour autant, les indicateurs morphologiques liés au diamètre minimum ne fournissent pas ici d'indications très pertinentes quant à l'hydrodynamique (tabl. IV).

Précisons que les paramètres de couleur, probablement liés non seulement aux teneurs mais aux types de matière organique et aux formes du fer, extraient plus de 60 % de la variabilité de la pente de D_{min} et donc de la vitesse à laquelle les agrégats se réorganisent.

De plus, la pluie d'imbibition n'augmente que faiblement en fonction de la pluie critique : $P_i = 26,2 + 0,3 P_c$, $r^2 = 36\%$. En d'autres termes, le ruissellement débute bien avant que l'ensemble des agrégats ne soient inclus dans une croûte.

Apparaît ainsi une différence notable, en termes d'infiltrabilité, entre :

T — les paramètres qui expriment la vitesse de formation de la croûte : pente de D_{min}, pluie critique,

TABLEAU III

Coefficients de corrélations multiples entre les tests de laboratoire et les variables d'encroûtement
Multiple correlation coefficients of crusting variables with stability and consistency indices

Variables expliquées	Variables explicatives	r ²
Pluie d'imbibition	+ Limite de liquidité	77
Pluie d'imbibition	+ (AGB - Sable grossier)	48
Pluie d'imbibition	+ (AGE - Sable grossier) + (AGA - Sable grossier)	60 68
Fn	+ Instabilité structurale	39
Fn	+ (AGE - Sable grossier) + (AGA - Sable grossier)	30 48
Log (Kr)	- Limite de liquidité + Instabilité structurale	59 74
Log (Pt + 0,01*)	+ 1/Limite de liquidité	44

* Pour tenir compte des cas où Pt=0

TABLEAU IV

Coefficients de corrélations multiples entre les indicateurs morphologiques et les variables d'encroûtement
Multiple correlation coefficients of crusting variables with morphological indices

Variables expliquées	Variables explicatives	r ²
Fn	+ 1/Épaisseur de la croûte	59
Log (Fn)	- Épaisseur de la croûte - Chroma	52 65
Log (Fn)	- Épaisseur de la croûte + % agrégats inclus	52 56
Kr	+ Épaisseur de la croûte + Chroma	46 58

— ceux qui caractérisent la croûte formée : le pourcentage d'agrégats inclus, encore reconnaissables à la surface du sol, et l'épaisseur de la croûte qui occupe le reste de la parcelle.

Ces caractéristiques de l'état final se révèlent de précieux indices d'infiltrabilité. Bien qu'inclus, les agrégats qui subsistent à la surface du sol, n'en continuent pas moins à participer à l'infiltration : leur porosité demeure plus élevée que celle de la croûte. En outre, comme l'ont remarqué BOIFFIN (1984) et PLEUVRET (1988), le micro-relief qui leur est associé favorise la détention superficielle, constitue des obstacles au ruissellement et augmente l'infiltration.

Déjà signalée lors de travaux menés au Burkina Faso

(ALBERGEL, RIEBSTEIN et VALENTIN, 1986), l'épaisseur de la croûte paraît un prédicteur hydrologique intéressant. Au reste, c'est sur ce critère et sur le nombre de micro-horizons constitutifs que se fonde la typologie des croûtes sahéniennes proposée par CASENAVE et VALENTIN, 1988. Ces résultats de terrain valident le concept de résistance hydraulique de croûte, rapport de son épaisseur sur sa conductivité hydraulique saturée (HILLEL et GARDNER, 1969).

L'épaisseur de la croûte, mesurée à la fin des pluies, dépend pour une bonne part ($r^2 = 62\%$) de l'état structural initial, caractérisé par le pourcentage d'agrégats, présents à la surface du sol avant les pluies, reflet du taux d'agrégation et donc du type de sol, ainsi que de leur diamètre maximal. Ainsi, l'infiltration reste d'autant plus élevée que la surface initiale est constituée de grosses mottes. Ce résultat indique, à la suite de nombreux auteurs dont JOHNSON, MANNERING et MOLDENHAUER (1979), que, pour réduire les risques d'encroûtement, il convient de limiter l'émission du lit de semence en s'assurant d'une large distribution du diamètre des mottes.

Influence de l'âge de la jachère

Bien qu'il soit hasardeux d'effectuer des traitements statistiques sur une population de six individus, nous avons cherché à déceler des tendances quant à l'influence de l'âge de la jachère et de la durée d'exploitation qui l'a précédée sur les principaux paramètres d'encroûtement (tabl. V). L'infiltrabilité diminue, le ruissellement

TABLEAU V

Coefficients de corrélations multiples entre les variables ayant trait au passé cultural et les variables d'encroûtement
Multiple correlation coefficients of crusting parameters with the numbers of years of fallow and antecedent land use

Variables expliquées	Variables explicatives	R ²
(LF+LG) / A	- 1 / Durée d'exploitation	90
Instabilité structurale	+ 1 / Age de la jachère	68
Dmax. avant les pluies	- 1 / Age de la jachère	84
Agrégats inclus	- 1 / Age de la jachère + 1 / Durée d'exploitation	65 88
Fn	- 1 / Age de la jachère + 1 / Durée d'exploitation	69 88
Kr	+ 1 / Age de la jachère - 1 / Durée d'exploitation	69 91
Pertes en terres	+ 1 / Age de la jachère + 1 / Durée d'exploitation	85 97

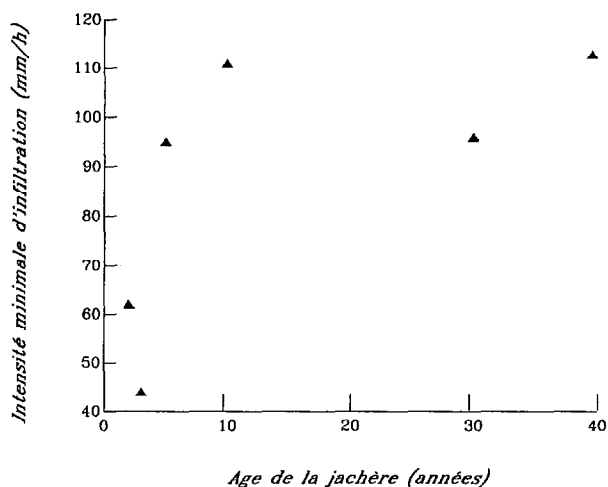


FIG. 2. — Influence de l'âge de la jachère sur l'intensité minimale d'infiltration.

Influence of the fallow duration on the steady infiltration rate.

et les pertes en terres augmentent lorsque la durée d'exploitation s'allonge et que la période de jachère se réduit (fig. 2).

Les résultats, conformes aux observations de CAUVEL (1977) et de ROOSE (1980), tendent à montrer que la mise en culture prolongée favorise l'appauvrissement superficiel des sols en argile puisque le rapport limons/argile augmente. En dépit d'une rapide augmentation de l'instabilité structurale après le défrichement (MOREAU, 1983), la dégradation n'est pas irréversible : passé un délai d'une dizaine d'années, on observe une restauration des paramètres structuraux.

Influence de la pédogenèse

Aux yeux du pédologue, il convient de situer les expérimentations selon la distribution des sols dans le paysage, afin de relier les résultats à l'ensemble des caractères de la couverture pédologique et d'en permettre une extrapolation cartographique. Dans cette perspective, il nous a paru nécessaire de décrire la variabilité des caractères des 14 parcelles du milieu naturel, estimée en fonction de leur distance au thalweg. Cette donnée topographique ne peut être qu'un descripteur local ; aussi n'a-t-il pas paru utile, cette fois-ci, d'établir de relations statistiques.

Deux grands types de variables apparaissent :

- Celles qui obéissent à des gradients :
 - diminution à partir du thalweg, de la pluie critique (fig. 3),
 - augmentation de la pente de D_{min} .
- Celles qui présentent à la mi-versant :

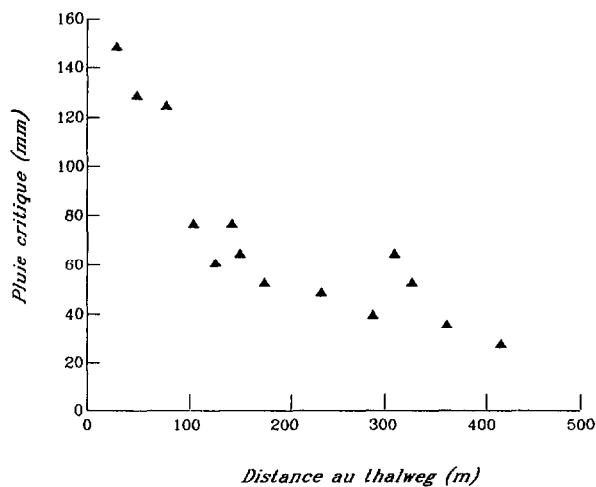


FIG. 3. — Variation de la pluie critique le long du versant. *Variation along the catena of the rainfall threshold above which every clod is incorporated in the structural crust.*

- un maximum : l'épaisseur de la croûte, le coefficient de ruissellement et les pertes en terre,
- un minimum : le taux de matière organique, la limite de liquidité, le taux d'agrégats stables à l'eau diminué des sables grossiers, la pluie d'imbibition et l'intensité minimale d'infiltration (fig. 4).

Ainsi, la dynamique de désagrégation superficielle, plus rapide en amont qu'à l'aval des versants, ne permet pas de présumer les propriétés hydrodynamiques des croûtes formées, singulièrement défavorables à l'infiltration en milieu de versant. En conséquence, il

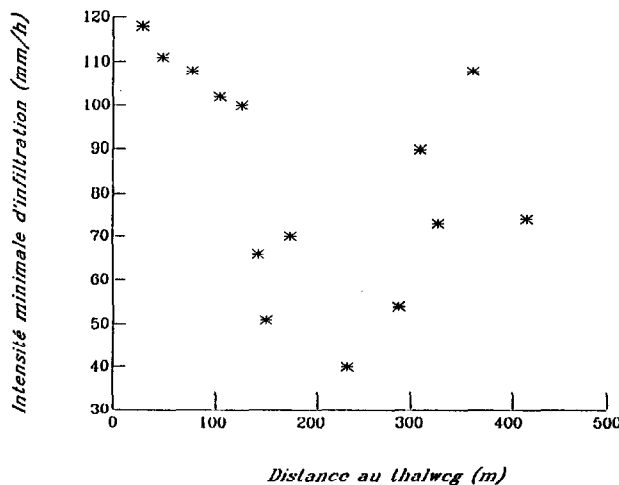


FIG. 4. — Variation de l'intensité minimale d'infiltration le long du versant.

Variation along the catena of the steady infiltration rate.

convient d'apprécier la dégradation superficielle selon deux critères indépendants :

— Sa *vitesse* : une fois travaillés, les sols rouges bien structurés de haut de versant fournissent de petites mottes qui se fondent rapidement au sein d'une pellicule. A l'inverse, une quantité plus élevée de pluie est nécessaire à l'intégration dans la croûte des mottes plus grosses, issues des sols massifs et jaunes de l'aval.

— Sa *sévérité* : c'est sur les sols ocres que l'encroûtement se manifeste le plus, et par son épaisseur, et par les propriétés hydrodynamiques qui en résultent. Ces résultats sont conformes au diagnostic fourni par la limite de liquidité. Ils corroborent, en outre, les mesures sous simulation de pluie, effectuées sur 17 autres parcelles du bassin-versant, sous végétation naturelle : les ruissellements les plus élevés s'observent sur les sols ocres (CHEVALLIER, 1988).

Cette distribution de l'infiltrabilité diffère de celle généralement observée sous forêt. Le plus souvent, le ruissellement, en effet, croît régulièrement depuis les sommets d'interfluvés jusqu'aux cours d'eau, facilitant ainsi la modélisation des débits à l'exutoire des petits bassins-versants forestiers (CASNAVE, GUIGUEN et SIMON, 1982).

Notons enfin que les sols indurés de la mi-versant n'ont pas été pris en compte lors de cette étude. Les résultats obtenus sur ces sols par BOA (1989) tendent à montrer que la présence d'éléments grossiers en surface réduit les risques de formation de croûte. Cette influence favorable, souvent signalée dans cette zone climatique (COLLINET et VALENTIN, 1979 ; CASTA *et al.*, à paraître), s'inverse dans les zones plus sèches où les éléments grossiers, souvent inclus dans une croûte épaisse à trois micro-horizons, forment des pavages très peu perméables (VALENTIN, 1981 ; CASNAVE et VALENTIN, 1988).

CONCLUSIONS

Il n'existe pas d'indices ou de tests universels de stabilité structurale. D'une part, l'influence de la composition granulométrique dépend du contexte pédologique, ce qui rend hasardeux les tentatives d'extrapolation à d'autres milieux. D'autre part, les interactions entre les conditions hydriques initiales et les facteurs climatiques impliquent de raisonner le choix des tests en fonction des phénomènes étudiés. L'indice de HENIN et MONNIER (1956) privilégie les processus d'éclatement des agrégats — en partie contrôlé par l'hydrophobie de la matière organique — qui interviennent lors d'un orage sur un

sol sec (LE BISSONNAIS, 1988). Sur sol humide, les pluies violentes favorisent la saturation rapide des premiers millimètres du sol et la désagrégation, sans éclatement, des agrégats. Des conditions hydriques et mécaniques analogues se trouvent plus ou moins reproduites lors de la détermination de la limite de liquidité d'Atterberg. D'où l'intérêt de ce test de consistance pour prédire les risques d'encroûtement de la saison des pluies.

Alors que les indicateurs morphologiques (BOIFFIN, 1984) permettent, en milieu tempéré, une prédiction satisfaisante de l'infiltrabilité, on observe, dans des conditions climatiques plus agressives et sur des sols nettement plus sableux, une indépendance entre la vitesse de réorganisation des agrégats et les propriétés hydrodynamiques de la croûte formée.

Toute mise en culture, fût-elle manuelle, entraîne dans cette région, des dégradations structurales superficielles, facteurs de ruissellement. Néanmoins, ces risques demeurent limités, pour peu que l'on veille, lors de l'utilisation des sols, au maintien de leur statut organique. Au reste, la jachère, sous réserve d'une durée suffisante — une dizaine d'années — permet une restauration satisfaisante des propriétés physiques. Cette possibilité de reconstitution des propriétés physiques du sol repose, il est vrai, sur des conditions optimales à bien des égards :

- le défrichement manuel, qui ne touche que des jachères généralement vieilles de plus de 40 ans, ne perturbe pas le sol et laisse en place les racines,
- la culture, également manuelle, n'est pratiquée ensuite qu'au cours d'une période d'environ 7 ans,
- le pâturage n'entre pas dans le système actuel de gestion des sols.

Au sein de cette zone climatique, les caractères des horizons superficiels reflètent assez bien ceux des horizons profonds. Ainsi, les seuls paramètres de couleur constituent de précieux indices au regard non seulement de la pédogenèse mais aussi du fonctionnement actuel. Cette concordance ne traduit pas pour autant un équilibre entre les sols et le climat actuel. Bien au contraire, la vieille couverture ferrallitique subit une dégradation minéralogique et structurale qui se manifeste d'abord dans les horizons supérieurs avant de transformer les horizons profonds (CHAUVEL, 1977 ; FRITSCH, BOA et PLANCHON, 1987).

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 30-10-1989.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.), VALENTIN (C.), 1986. — L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. ORSTOM, collec. *Colloques et Séminaires* : 25-48.
- ASSELINE (J.), VALENTIN (C.), 1978. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XV, 4 : 321-349.
- BOA (D.), 1989. — Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de 3^e cycle, Université d'Abidjan.
- BOIFFIN (J.), 1976. — Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.* 27 (4) : 447-463.
- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 320 p. + annexes.
- BOIFFIN (J.), MONNIER (G.), 1986. — Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In : Assessment of surface sealing and crusting, C. Callebaut, D. Gabriels and M. De Boodt eds., Belgium, University of Ghent : 210-217.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.), 1982. — Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIX, 4 : 229-252.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne. ORSTOM, Paris, 202 p.
- CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Sénégal). Thèse d'Etat, Univ. de Strasbourg. *Trav. et Doc.*, n° 62, ORSTOM, Paris, 532 p.
- CHEVALLIER (P.), 1988. — Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse, Université de Montpellier, 331 p.
- COLLINET (J.), 1988. — Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 521 p., + annexes.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. — Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVII, 4 : 283-328.
- DAVOINE (J.L.), 1988. — Analyse des données pluviographiques du poste d'Odienné (Côte d'Ivoire). Rapport de stage, ORSTOM, Montpellier, 21 p., 8 réf., + annexes, *multigr.*
- DE VLEESCHAUWER (D.), LAL (R.), DE BOODT (M.), 1978. — Comparison of detachability indices in relation to soil erodibility for some important Nigerian soils. *Pédologie*, 28 (1) : 5-20.
- FRITSCH (E.), PLANCHON (O.), BOA (D.), 1987. — Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques. Séminaire régional de Yaoundé sur les latérites. Collec. *Colloques et Séminaires* de l'ORSTOM, 12 p., 11 fig.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), 1956. — Evaluation de la stabilité de la structure du sol. Cong. Int. Science du Sol, VI, Paris, Vol. B : 49-52.
- HILLEL (D.), GARDNER (W.R.), 1969. — Transient infiltration into crust topped profiles. *Soil Sci.*, 109 (2) : 69-76, 8 ref.
- JANEAU (J.L.), VALENTIN (C.), 1988. — Relations entre les nids de *Trinervitermes* et la surface du sol : réorganisations, ruissellement et érosion. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 24 (4) : 637-647, 3 fig., 4 tabl.
- JOHNSON (C.B.), MANNERING (J.V.), MOLDENHAUER (W.C.), 1979. — Influence of surface roughness and clode size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 43 : 772-777.
- LAFFORGUE (A.), 1977. — Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIV, 4 : 299-344.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. — Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse, Université d'Orléans, 195 p., + annexes.
- LEPAGE (M.), TANO (Y.), 1986. — Les termitières épigées d'un bassin versant en zone soudanienne. Premiers résultats obtenus. Actes Coll. Insectes Sociaux, CNRS, Paris, 3 : 133-142.
- MITJA (D.), 1987. — Bassin versant de Booro-Borotou. Esquisse de la carte de la végétation à 1/2 500. ORSTOM, Adiopodoumé, 6 p. + 1 carte h.t., *multigr.*
- MONNIER (G.), 1965. — Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris, 140 p.
- MOREAU (R.), 1983. — Evolution des sols sous différents modes de mise en culture, en Côte d'Ivoire forestière et préforestière. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 20 (4) : 311-326, 3 tabl., 10 fig., 8 réf.
- PIERI (C.), MOREAU (R.), 1987. — Fertilité des sols et fertilisation des cultures tropicales. L'expérience du CIRAD et de l'ORSTOM. In : Sols et eaux. Acquis et perspectives de la Recherche agronomique française en zone intertropicale. ORSTOM, Paris : 67-92.
- PLANCHON (O.), FRITSCH (E.), VALENTIN (C.), 1987. — Rill development in a wet savannah environment. *Catena Suppl.*, 8 : 55-70, 7 fig., 5 tabl., 4 photo., 13 réf.

- PLEUVRET (C.), 1988. — Infiltration et réorganisations superficielles sous pluies simulées. Cas des sols ferrallitiques du Sud Togo. DEA de Pédologie, ORSTOM, Paris, 79 p.
- POSS (R.), VALENTIN (C.), 1983. — Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation : une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola - Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XX, 4 : 341-360.
- ROOSE (E.), 1980. — Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse, Université d'Orléans. *Trav. et Doc.* n° 130, ORSTOM, Paris, 1985, 569 p.
- RUIZ FIGUEROA (J.F.), 1983. — Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluies simulées sur des sols ferrallitiques de savane (Centre Nord de la Côte d'Ivoire). Comportement hydrique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture, la couverture du sol et la levée du riz pluvial. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 167 p.
- SEBILLOTTE (M.), 1968. — Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. Agron.* 19 (4) : 403-414.
- VALENTIN (C.), 1981. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau : Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII. *Etudes et Thèses*, ORSTOM, 1985, 259 p.
- VALENTIN (C.), CAMARA (M.), 1988. — Evolution des états de surface, de l'infiltrabilité et de la détachabilité sous culture d'arachide, de manioc et de riz pluvial en zone de savane humide. ORSTOM, Adiopodoumé, 13 p., 7 fig.
- VALENTIN (C.), RUIZ FIGUEROA (J.F.), 1987. — Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. *In* : Micromorphologie des sols, *AISS/AFES*, Paris : 401-408, 5 tabl., 4 fig., 14 réf.