

Dégradation du profil cultural : croûtes superficielles, érosion et semelles de labour

Degradation of the cultivation profile: surface crusts, erosion, and plough pans

CHRISTIAN VALENTIN*

Résumé

La gestion des sols réclame la prise en compte des contraintes physiques telles que les risques de formation de croûtes superficielles, d'érosion et d'apparition de niveaux indurés comme les semelles de labour. Pour chacune de ces formes de dégradation, il existe des méthodes d'identification et de mesures sur le terrain, ainsi que des tests de laboratoire. A l'encontre des études portant sur la fertilité chimique, l'accent doit être porté, dans ce domaine, sur les travaux de terrain, lieu privilégié des études communes entre les agronomes et les pédologues. En outre, pour être pertinentes, les observations et les mesures doivent être repérées tant dans l'espace - topographie, sols,... - que dans le temps. La géométrie des organisations induites par le travail du sol varie en effet selon des dynamiques qu'il est indispensable de mettre en évidence. Suivant ces principes, il est possible de proposer aux participants des réseaux de l'IBSRAM un ensemble minimal d'observations et de mesures.

Abstract

Soil management requires taking into account physical constraints, such as the risk of surface crusts forming, erosion, and the appearance of hardened layers such as plough pans. For each of these forms of degradation, there are methods of identification and of measurement in the field, as well as laboratory tests. Unlike studies relating to chemical fertility, in matters concerning degradation emphasis must be placed on field studies, which benefit from being the common ground of both agronomists and soil scientists. Moreover, to be relevant, observations and measurements need to be orientated in space - topography, soils, etc. - just as much as in time. In fact, the geometry of the patterns induced by working the soil varies in accordance with changes which have to be demonstrated. In accordance with these principles, it is possible to suggest a minimum number of observations and measurements for IBSRAM network cooperators.

* ORSTOM, B.P. V-51, Abidjan, Côte d'Ivoire

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 24227

EX 1

233

Cote : B

P29

Introduction

La fertilité chimique et son évolution retiennent une part importante de l'attention des expérimentateurs tant elles conditionnent la production agricole. Toutefois, force est d'admettre que l'approche agronomique ne se réduit pas à ce seul point de vue. Prenant en compte l'ensemble des relations climat-sol-plante, elle intègre le suivi de nombreux paramètres physiques. Ainsi, les risques de dégradation du profil cultural sous l'effet d'un climat agressif et de techniques agricoles peu appropriées peuvent constituer des contraintes majeures : pertes à la levée provoquées par la présence d'une croûte superficielle, entraînement d'éléments fertilisants par érosion, enracinement limité par l'existence d'une semelle de labour, réduction des échanges hydriques et gazeux.

Au cours de cet exposé, nous passerons en revue les méthodes qui nous paraissent les mieux adaptées aux conditions des réseaux de l'IBSRAM pour étudier les trois grandes formes de dégradation du profil cultural : la formation de croûtes superficielles, l'érosion et l'apparition de discontinuités au sein du profil cultural. Nous distinguerons, dans chaque cas, les méthodes :

- d'identification des formes de dégradation sur le terrain,
- de mesures au champ,
- d'analyse de laboratoire.

Nous porterons surtout l'accent sur les méthodes simples de terrain qui permettent de suivre les dynamiques évolutives au cours des cycles culturaux. Nous ne négligerons pas pour autant les méthodes de laboratoire qui permettent d'estimer les risques de dégradation à partir de caractères intrinsèques de sols et peuvent ainsi s'avérer utiles lors du choix et de la caractérisation des sites expérimentaux.

Introduction

Chemical fertility and the way in which it evolves are a matter of serious concern to research workers because of their importance in agricultural production. At the same time, it should be realized that the agronomic approach is not only concerned with this particular aspect. It involves climate-soil-plant relationships in their entirety, integrating the monitoring of a range of physical parameters. The risks of degrading the cultivation profile as a result of an aggressive climate and unsuitable agricultural techniques can constitute major constraints: losses on emergence caused by a surface crust, the leaching of nutrient elements through erosion, limited root development because of a plough pan, a reduction in moisture and gas exchanges, etc.

This paper will review methods which seem most suited to the conditions prevailing in IBSRAM networks for studying the main forms of degradation of the cultivation profile: crust formation, erosion, and the formation of discontinuities in the cultivation profile. A distinction will be made in each case between:

- identifying the types of land degradation in the field,
- making field measurements, and
- carrying out laboratory analyses.

The emphasis will be on simple field methods which enable us to understand the changes which occur during cultivation cycles. At the same time, laboratory methods which make it possible to estimate degradation risks from intrinsic soil characteristics, and which consequently can be useful in selecting and characterizing experimental sites, will not be excluded.

Les croûtes superficielles

Identification au champ

Typologie des croûtes

La préparation d'un lit de semences a pour objectif d'établir, entre autres, des conditions favorables à l'infiltration et à la levée des jeunes pousses. Néanmoins, sous l'effet des pluies, la surface du sol se couvre, plus ou moins rapidement, d'une croûte qui, elle-même, subit des transformations. Il importe de reconnaître les différents stades de cette évolution pour les relier à d'autres phénomènes : pertes à la levée, apparition du ruissellement, de l'érosion, de signes de stress hydrique. A cet effet, il est possible de s'appuyer sur une typologie des croûtes, proposée pour les régions sahéliennes (Casenave et Valentin, 1988) mais qui peut être utilisée ailleurs. Neuf types de croûtes ont été identifiés en fonction de la nature du microhorizon affleurant, du nombre de microhorizons, et de la continuité de ces microhorizons (figure 1). En fait, en milieu cultivé, ce nombre se réduit à 7 :

- *Croûte de dessiccation* : elle se caractérise par l'affleurement d'un microhorizon sableux, unique, légèrement pris en masse, très fragile, pouvant atteindre plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur.
- *Croûte structurale* : on en distingue trois types :
 - *Structurale 1* : cette croûte se forme dès les premières pluies. Généralement assez épaisse (pouvant atteindre 10 mm ou plus), elle présente une forte rugosité. Elle inclut en effet des agrégats partiellement fondus. Elle ferme alors la porosité superficielle, contrastant ainsi avec l'horizon travaillé sous-jacent où peut se maintenir une forte porosité.
 - *Structurale 2* : cette croûte est constituée d'un microhorizon sableux, souvent pris en masse et continu et d'une pellicule plasmique, c'est-à-

Surface crusts

Identification in the field

Crust typology

Preparing a seedbed has, amongst other things, the purpose of ensuring favourable conditions for infiltration and for the emergence of young seedlings. Nevertheless, under the influence of rainfall, sooner or later the surface of the soil becomes covered with a crust, which itself then undergoes changes. It is important to recognize the different stages of this evolution to relate them to other phenomena: losses on emergence, the appearance of runoff, erosion, and signs of moisture stress. In order to do this, a crust typology can be used, as prepared for the sahelian regions (Casenave and Valentin, 1988), but which could be used elsewhere. Nine types of crust have been identified based on the nature of the outcropping microhorizon, the number of microhorizons, and their continuity (Figure 1). In fact, in cultivated environments, there are only seven types of crust:

- *Drying crust*: This type of crust is characterized by the outcropping of a single sandy microhorizon, with a weak massive structure, very fragile, and possibly as much as several tens of millimetres thick.
- *Structural crust*: These are of three types:
 - * *Structural crust 1*: This crust forms as soon as the first rainfall occurs. Generally quite thick (as much as 10 mm or more), it is very reddish in colour. In fact it contains partially disintegrated aggregates. It then seals the surface porosity, in contrast to the cultivated horizon below it which can maintain a high degree of porosity.

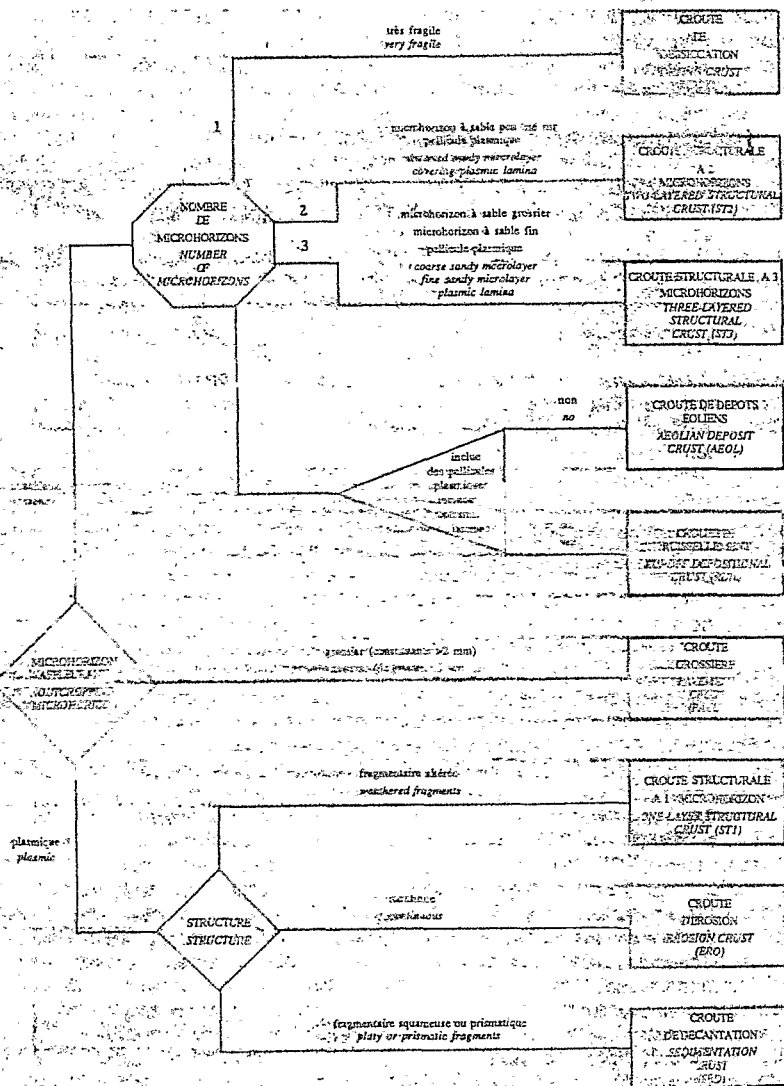


Figure 11. Clé de détermination des principales croûtes sahéliennes (D'après Casenave et Valentin, 1988.)

Key to the main types of Sahelian crusts. (From Casenave and Valentin, 1988.)

dire constitué d'éléments fins, de taille inférieure aux sables. Dans ces deux microhorizons, la porosité vésiculaire reste discrète.

Structurale 3 : elle présente la succession verticale suivante : au sommet, un microhorizon de sable fin, pris en masse, à forte porosité vésiculaire, enfin, à la base, une pellicule plasmique à porosité vésiculaire.

Croûte de ruissellement : les croûtes de ruissellement se composent de microhorizons sableux qui alternent avec de minces pellicules plasmiques. Elles présentent fréquemment une forte porosité vésiculaire. Sur faible pente, leur épaisseur peut atteindre plusieurs centimètres, particulièrement entre des billons.

Croûte d'érosion : une telle croûte n'est formée que d'une seule pellicule plasmique, prise souvent très peu épaisse. Elle correspond à l'évolution des croûtes structurales à

Un microhorizon. Dans ce cas, l'érosion par rejaillissement et par ruissellement a effacé la rugosité des anciens agrégats. Bien que peu épaisse, la pellicule plasmique présente une porosité très réduite.

Deux ou trois microhorizons : Les microhorizons superficiels ont été décapés par le ruissellement (éventuellement par le vent), faisant affleurer la pellicule plasmique.

Croûte de décantation : le tri granulométrique qui précède à la formation de ce type de croûte est conforme à la sédimentation. Les éléments grossiers se localisent à la base, les éléments fins au sommet (distribution inverse de celle des croûtes structurales à 2 ou 3 microhorizons). A l'état sec, cette croûte présente souvent des fentes qui délimitent des prismes, des plaquettes, ou des squames (plaquettes rebroussées).

Relations dans le temps

Sur les sols cultivés contenant moins de 60% de sable, l'évolution de la

* Structural crust 2: This crust is composed of a sandy microhorizon, often massive and continuous, and a plasmic film of fine elements smaller than sand particles. In these two microhorizons, vesicular porosity remains distinct.

* Structural crust 3: This crust exhibits the following vertical sequence: at the top a microhorizon consisting of coarse sand, then a microhorizon of fine sand, with a massive structure and a high degree of vesicular porosity, and finally, at the bottom a plasmic film with vesicular porosity.

- **Runoff crust:** Runoff crusts are composed of sandy microhorizons alternating with thin plasmic laminae. They often show marked vesicular porosity. On a gentle slope, they may be as much as several centimetres thick, particularly between ridges.

- **Erosion crust:** This type of crust is formed from only a single plasmic film, smooth, and often very thin. It results from the evolution of structural crusts with -

One microlayer. In this case, erosion caused by splash and runoff has effaced the reddish colour of the old aggregates. Although the plasmic film is not very thick, it has a very low porosity.

* Two or three microhorizons. The surface microhorizons are removed by runoff and possibly by wind, causing the plasmic film to outcrop.

- **Depositional crust:** The textural sorting which takes place during the formation of this type of crust is a kind of sedimentation: the larger elements sink to the bottom, and the finer elements stay at the top (giving an inverse distribution to that found in structural crusts with 2 or 3 microhorizons). When dry, this type of crust often has cracks which define prisms, plates or scales (reversed plates).

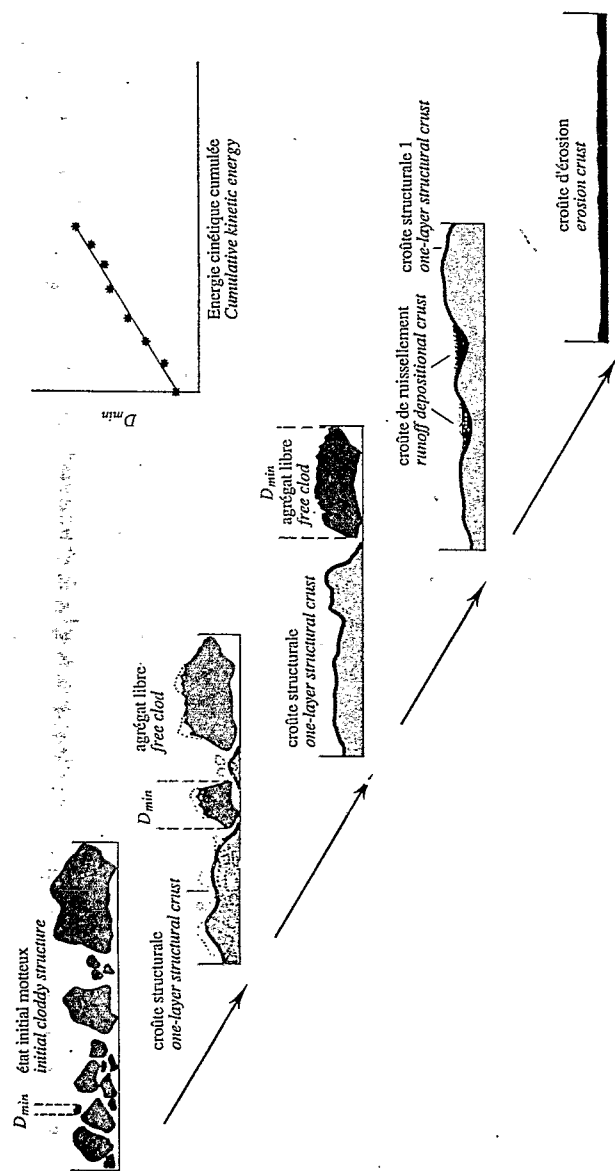


Figure 2. Evolution d'un lit de semence sur un sol à texture moyenne. Evolution du calibre minimum D_{min} en fonction de l'énergie cinétique cumulée des pluies. Usual sequence of crust formation in loamy soils. Consecutive evolution of D_{min} as a function of kinetic energy after rain.

surface du sol sous les pluies suit schématiquement la séquence suivante (figure 2) :

- Structure motteuse après la préparation du lit de semences.
- Croûte structurale à un microhorizon : les mottes et agrégats se fondent peu à peu dans une croûte continue qui ferme la porosité et provoque l'apparition du ruissellement.
- Croûte de ruissellement : dans les points bas, les particules détachées se déposent dans la lame d'eau en mouvement.
- Croûte de décantation : si le microrelief s'oppose au ruissellement, des flaques se forment, propices à la sédimentation des particules détachées.
- Croûte d'érosion : elle se forme aux dépens des croûtes précédentes, d'abord sur les points hauts, puis sur une partie croissante de la parcelle, au fur et à mesure que le microrelief lié aux mottes s'estompe.

Sur les sols contenant plus de 60% de sable, l'évolution structurale diffère quelque peu :

- Structure motteuse après la préparation du lit de semences. Une partie de la surface n'est pas occupée par des mottes mais par du sable déjà délié.
- Selon l'intensité des pluies, mais aussi de la distribution granulométrique des sables, les mottes sableuses se délitent, donnant naissance à des croûtes de dessiccation, ou structurales à deux ou trois microhorizons.
- L'évolution conduit ensuite à la formation de croûtes de ruissellement ou de décantation, puis de croûtes d'érosion.

A ces schémas d'évolution correspondent des degrés de dégradation de la structure plus ou moins marquée, eux-mêmes reliés à une infiltrabilité décroissante. L'identification des différents types de croûtes permet à un instant donné de situer un état de surface en fonction de ces séquences évolutives. Elle fournit des éléments de comparaison entre les types de sols ou les traitements.

Temporal relationships

On soils containing less than 60% sand, changes in the soil surface as a result of rainfall follows the following schematic sequence (Figure 2):

- Crumb structure after preparation of the seedbed.
- Structural crust with one microhorizon: the crumbs and aggregates gradually merge into a continuous crust which seals the porosity and causes runoff to appear.
- Runoff crust: in the lower parts, the detached particles are deposited in a sheet of moving water.
- Depositional crust: if the microtopography prevents runoff, pools will form, favouring the sedimentation of detached particles.
- Erosion crust: this is formed, to the detriment of the previous crusts, initially on the higher points, then on an increasing area of the plot, as the microtopography associated with the crumbs diminishes.

On soils containing more than 60% sand, structural changes are somewhat different:

- Crumb structure after preparing the seedbed. Part of the surface does not consist of crumbs, but of loosened sand.
- Depending on the intensity of the rainfall, and also on the size distribution of the sand; the sandy crumbs disintegrate, giving rise to drying crusts, or to structural crusts with two or three microhorizons.
- These changes eventually produce runoff or depositional crusts, and finally erosion crusts.

The patterns of evolution described above involve more or less marked structural degradation, associated with decreasing infiltrability. The identification of different types of crust makes it possible at any given moment to

Relations dans l'espace

Le microrelief cultural entraîne des conditions de formations différentes pour les croûtes (figure 3) selon qu'elles occupent :

- des points hauts : croûte structurale puis croûte d'érosion,
- des points bas endoréiques : croûte structurale puis croûte de décantation,
- des points bas où le ruissellement est libre : croûte structurale, puis croûte de ruissellement, enfin croûte d'érosion.



Figure 3. Types de croûtes dans un champ de sorgho billonné.

- 1 - Croûte structurale 1
- 2 - Croûte d'érosion
- 3 - Croûte de ruissellement
- 4 - Croûte de décantation

(D'après Casenave et Valentin, 1988.)

recognize a surface condition in terms of its sequential changes, and provides a basis for comparing soil types or treatments.

Spatial relationships

The microtopography associated with cultivation produces different conditions of crust formation (Figure 3), notably with regard to whether it takes place on:

- * higher areas: structural crust followed by erosion crust;
- * depressions with restricted runoff: structural crust and depositional crust;
- * depressions with unrestricted runoff: structural crust, then followed by runoff crust, and finally erosion crust.

Types of superficial crusts in a sorghum field

- 1 - One-layered structural crust
- 2 - Erosion crust
- 3 - Runoff depositional crust
- 4 - Sedimentation crust

(From Casenave and Valentin, 1988.)

Mesures sur le terrain

Concernant la structure

a) Caractérisation de l'état initial

Il importe de caractériser correctement l'état initial du lit de semences avant les pluies afin d'effectuer des comparaisons entre les différents traitements. A cet effet, il est aisé de délimiter une ou plusieurs parcelles d'un mètre, au sein desquelles on note tous les 10 cm l'absence ou la présence de mottes, et le cas échéant leur calibre. En l'absence d'un dispositif de mesures particulier, généralement un bâti muni d'aiguilles qu'on laisse tomber verticalement sur le sol, il est facile et peu coûteux de mettre en place un réseau régulier de ficelles : chaque intersection - 100 par mètre - constitue un point de mesures. Ces données permettent d'établir la distribution relative cumulée du diamètre des agrégats (figure 4).

b) Mesure du calibre minimum D_{min}

Au cours des pluies, les mottes les plus petites sont les premières à se désagréger (Johnson, Mannering et Moldenhauer, 1979). Elles perdent peu à peu leur individualité : elles deviennent coalescentes tandis que leur base se fond au sein de la croûte structurale. Pour suivre cette dynamique, Boiffin (1984) a proposé une méthode originale qui, mise au point en milieu tempéré, s'avère, à l'expérience, bien adaptée aux conditions tropicales.

Elle se fonde sur le suivi de l'indicateur D_{min} . Ce terme désigne le calibre du plus petit fragment d'agrégat qui n'est pas encore incorporé dans la croûte structurale. Pour le mesurer, il est nécessaire de repérer, à un instant donné, la taille de la motte, ou de l'agrégat, qui a conservé son entière individualité : ses contours restent nets, elle n'adhère ni à d'autres agrégats, ni à la croûte déjà formée. Une motte libre ne doit

Measurements in the field

Structure

a) Characterization of the initial state

It is important to make an accurate characterization of the initial state of the seedbed before the rain falls in order to compare the different treatments. For this purpose, it is convenient to mark off one or more 1 m plots, within which the presence or absence of crumbs and, if required, their grade, is noted at 10 cm intervals. In the absence of special measuring devices, such as a rod mounted with needles dropped vertically onto the soil, it is easy and costs little to put in place a regular network of string with each intersection (100 per square metre) marking an observation point. This information can be used to calculate the cumulative relative distribution of aggregate diameter (Figure 4).

b) Determination of the minimum grade (D_{min})

During rain, the smallest crumbs are the first to lose their aggregation (Johnson, Mannering and Moldenhauer, 1979). They progressively lose their individuality, their bases coalescing together to form the structural crust. To observe these changes, Boiffin (1984) has suggested an original method which, perfected in a temperate environment, has shown itself in use to be well adapted to tropical conditions.

It is based on monitoring the index D_{min} . This term designates the size of the smallest aggregate fragment not yet incorporated in the structural crust. To measure it, it is necessary to note the size of the

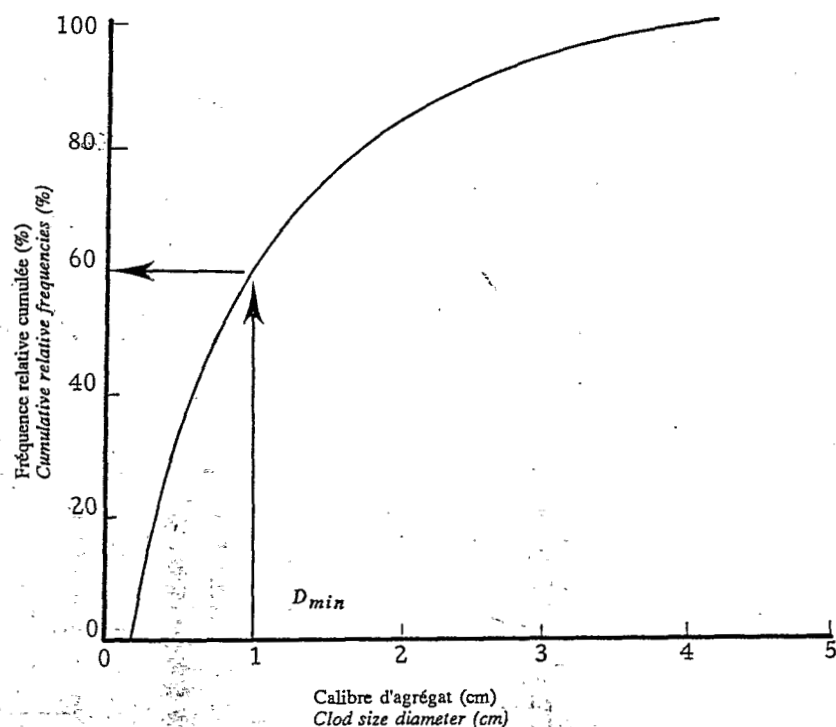


Figure 4. Caractérisation de l'état initial. Détermination du pourcentage de surface encroûtée à partir du calibre minimum D_{min} . (D'après Boiffin, 1984.)
Initial clod size distribution. Percentage of crusted area as assessed through D_{min} . (From Boiffin, 1984.)

pas laisser de "cicatrice" dans la croûte lorsqu'on la soulève.

Cet indicateur est étroitement corrélé à la masse de terre déplacée depuis le début de formation de la croûte, et à l'infiltrabilité du sol humide. Pratiquement indépendant de la taille des agrégats initiaux, ce calibre minimum, D_{min} , augmente au fur et à mesure que la croûte se développe. Une corrélation significative peut être généralement établie entre D_{min} et l'énergie cinétique des pluies (figure 2). La valeur du coefficient de pente de cette régression

crumb or the aggregate which has completely retained its individuality: its shape is still distinct and it adheres neither to other aggregates nor to the crust already formed. A free crumb of this type leaves no scar in the crust when it is removed.

This index is closely correlated with the mass of soil displaced since the initiation of crust formation, and the infiltrability of the wet soil. Almost independently of the initial aggregate size, this grade calibre, D_{min} , increases progressively with

linéaire est alors considérée comme caractéristique (tableau 1). En l'absence de pluviographe, nécessaire à la détermination de l'énergie cinétique, il peut être intéressant de porter en abscisses la hauteur des pluies cumulées depuis le début des observations (tableau 2).

Cet indicateur renseigne également sur le pourcentage de surface occupé par la croûte: il suffit de se rapporter à la courbe de caractérisation de l'état initial (figure 4).

Concernant le comportement

a) Infiltrabilité

La méthode du double anneau, souvent utilisée pour apprécier l'infiltrabilité des sols, ne donne pas toujours entière satisfaction. A plusieurs reprises (Lafforgue et Naah, 1976; Valentin, 1981; Poss et Valentin, 1983), elle a fait l'objet de critiques:

- La mise en place du double anneau provoque, au moins partiellement, une destruction de la croûte.
- Ce dispositif empêche le ruissellement et met en oeuvre une hauteur d'eau bien supérieure à celle d'une lame ruisselée.
- Lors de son apport, et même après, cette lame d'eau favorise les processus de réorganisation de la croûte superficielle, pouvant mener à une transformation du type de croûte - d'une croûte structurale à une croûte de décantation, par exemple.
- Ces conditions peu réalistes conduisent à l'obtention de valeurs très éloignées de celles mesurées en conditions naturelles, ou sous pluies simulées: l'infiltrabilité mesurée sous double anneau est de l'ordre de dix fois supérieure à celle mesurée sans obstacle au ruissellement.
- Plus grave encore, le classement obtenu sous double anneau n'est

the development of the crust. A significant correlation can generally be shown between D_{min} and rainfall kinetic energy (Figure 2). The slope coefficient of this linear regression is then considered characteristic (Table 1). In the absence of rainfall graphs needed to calculate kinetic energy, it can be useful to plot on the absciss the cumulative rainfall from the start of the observations (Table 2).

This index also gives information on the percentage of the surface occupied by the crust, simply by referring to the curve characterizing the initial state.

Properties

a) Infiltrability

The double-ring method, often used to determine soil infiltrability, does not always work completely satisfactorily, and has been criticized on several occasions (Lafforgue and Naah, 1976; Valentin, 1981; Poss and Valentin, 1983):

- The installation of the two rings results in at least partial destruction of the crust.
- The equipment impedes runoff and makes use of a height of water much greater than that of runoff water.
- When in place, and even after, this sheet of water facilitates the processes of superficial crust reorganization and can lead to a change in crust type - from, for example, a structural crust to a depositional crust.
- These unrealistic conditions lead to values being obtained which are far removed from those obtained under natural conditions or under simulated rainfall. The infiltrability measured in a

Tableau 1. Paramètres statistiques des relations $D_{min} = f(\Sigma Ec)$ (cf. figure 2).

Site	M	P	B	B	B	A	A
Texture	loam limoneux	loam argileux	sable loameux gravillons sans labour	sable loameux gravillons 1 labour par an	sable loameux gravillons 2 labours par an	sable loameux	loam argileux
Remarques	instable	très instable				très instable	instable
Ordonnée à l'origine	0,08	-0,13	0,78	-0,07	0,13	-0,34	0,38
Pente (10-3)	3,6	1,7	1,9	6,5	6,9	25,8	8,8
r ² (%)	42,0	73,7	80,4	95,6	94,5	96,2	98,2
Nombre d' observations	119	106	43	17	16	37	104
Sources	Boiffin (1984)	Boiffin (1984)	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Valentin inédit	Valentin inédit
M : Montluel B : Bouake	P : Palaiseau (France) A : Adioposoumé (Côte d'Ivoire)						

Table 1. Statistical parameters of the relationships $D_{min} = f(\Sigma Ec)$ (cf. Figure 2).

Site	M	P	B	B	B	A	A
Texture	silty loam	clay loam	gravelly loamy sand	gravelly loamy sand	gravelly loamy sand	loamy sand	clay loam
Remarks	unstable	very unstable	no ploughing	1 ploughing a year	2 ploughings a year	very unstable	unstable
Original ordinate	0.08	-0.13	0.78	-0.07	0.13	-0.34	0.38
Slope (10-3)	3.6	1.7	1.9	6.5	6.9	25.8	8.8
r ² (%)	42.0	73.7	80.4	95.6	94.5	96.2	98.2
Number of observations	119	106	43	17	16	37	104
Sources	Boiffin (1984)	Boiffin (1984)	Casta <i>et al.</i> (forthcoming)	Casta <i>et al.</i> (forthcoming)	Casta <i>et al.</i> (forthcoming)	Valentin (unpublished)	Valentin (unpublished)
M : Montluel B : Bouake	P : Palaiseau (France) A : Adioposoumé (Côte d'Ivoire)						

Tableau 2. Paramètres statistiques des relations $D_{min} = f(\Sigma Pluie)$.

Site	M	P	B	B	B	A	A
Texture	loam limoneux	loam argileux	sable loameux gravillons sans labour	sable loameux gravillons 1 labour par an	sable loameux gravillons 2 labours par an	sable loameux	loam argileux
Remarques	instable	très instable				très instable	instable
Ordonnée à l'origine	0,28	0,76	0,65	-0,07	0,13	-0,34	0,38
Pente (10-3)	32,5	1,7	40,7	123,2	130,1	378,7	129,6
r ² (%)	32,7	3,8	85,2	95,6	85,2	96,2	98,2
Nombre d' observations	119	106	43	17	16	37	104
Hauteur de pluie (mm) pour $D_{min} = 5$ cm	145	-	107	41	37	14	42
Sources	Boiffin (1984)	Boiffin (1984)	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Valentin inédit	Valentin inédit
M : Montluel B : Bouake	P : Palaiseau (France) A : Adioposoumé (Côte d'Ivoire)						

Table 2. Statistical parameters of the relationships $D_{min} = f(\Sigma Rain)$.

Site	M	P	B	B	B	A	A
Texture	silty loam	clay loam	gravelly loamy sand	gravelly loamy sand	gravelly loamy sand	loamy sand	clay loam
Remarks	unstable	very unstable	no ploughing	1 ploughing a year	2 ploughings a year	very unstable	unstable
Original ordinate	0.28	0.76	0.65	-0.07	0.13	-0.34	0.38
Slope (10-3)	32.5	1.7	40.7	123.2	130.1	378.7	129.6
r ² (%)	32.7	3.8	85.2	95.6	85.2	96.2	98.2
Number of observations	119	106	43	17	16	37	104
Rainfall (mm) for $D_{min} = 5$ cm	145	-	107	41	37	14	42
Sources	Boiffin (1984)	Boiffin (1984)	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Casta <i>et al.</i> à paraître	Valentin inédit	Valentin inédit
M : Montluel B : Bouake	P : Palaiseau (France) A : Adioposoumé (Côte d'Ivoire)						

pas toujours le même que celui établi selon des méthodes plus réalistes. En effet, les réactions de la surface du sol au choc des gouttes de pluie diffèrent de celles qui résultent de l'apport d'une épaisse lame d'eau.

Pour toutes ces raisons, il semble dangereux d'utiliser des données d'infiltrabilité obtenues sous double anneau pour prévoir les risques de ruissellement - et d'érosion - en les confrontant aux données climatiques : dans bien des cas, on conclurait trop hâtivement à l'absence de risque. Quelle autre méthode préconiser? L'équipement de nombreuses parcelles de pluviographes et de limnigraphes serait très coûteux ; aussi doit-on rechercher des solutions moins onéreuses. Parmi ces dernières, signalons la méthode proposée par des chercheurs français (Boiffin, 1984 ; Boiffin et Monnier, 1986). Elle consiste à apporter l'eau à la surface du sol à l'aide de goutteurs et à mesurer le diamètre de la tache luisante qui se forme à saturation (figure 5).

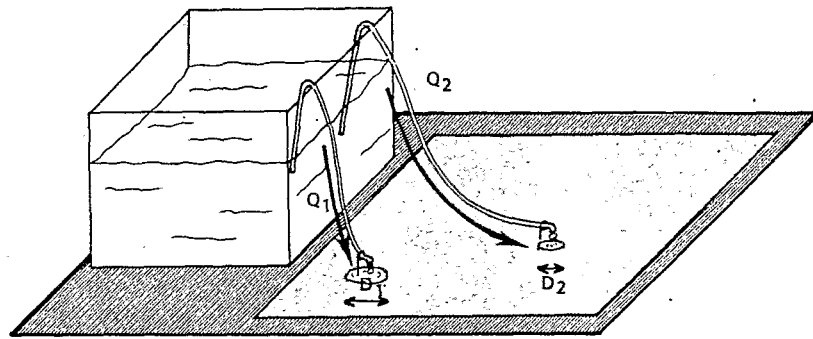


Figure 5. Principes du dispositif des taches saturées. (D'après Boiffin et Monnier, 1986.)
Principles of the saturated spot method. (From Boiffin and Monnier, 1986.)

double ring is of the order of ten times larger than that measured where there is no obstacle to runoff.

- Even more seriously, the grading obtained by the double-ring method is not always the same as that obtained by more realistic methods. In effect, the reactions of the soil surface to the force of the raindrops differ from those resulting from using a considerable depth of water.

For all these reasons, it seems hazardous to use double-ring infiltration figures to predict erosion and runoff risks by comparing them with climatic data: in many cases one would conclude too hastily that there was no risk. What other method can be considered? Fitting out numerous plots with pluviographs and limnigraphs would be very expensive, so easier solutions must be sought. Among the latter, we draw attention to the method

En pratique, on dispose une quinzaine de tubes capillaires de longueurs variées et alimentées par trois petits réservoirs de hauteurs d'eau différentes. Ainsi obtient-on une gamme assez étendue de débits Q . Ces débits varient en fonction de la température et doivent être déterminés à partir d'un étalonnage préalable. A saturation, généralement atteinte après 30-40 minutes, le diamètre D des taches reste constant. Si l'on néglige l'évaporation, l'intensité d'infiltration F peut être évaluée selon la formule :

$$F = \frac{40 Q}{\rho D^2}$$

avec :

F : l'intensité d'infiltration, en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$

Q : débit du capillaire, en $\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$

D : diamètre de la tache saturée, en cm .

Le nombre assez élevé de répétitions permet d'apprécier l'éventuelle variabilité de F et de disposer d'un nombre suffisant de mesures, après l'élimination des valeurs qui ne correspondent pas aux conditions d'application de cette méthode : absence de tache, apparition d'une flaque, voire de ruissellement.

Précisons que cette méthode ne peut être utilisée qu'en conditions très humides : après une pluie, par exemple, pendant la saison de culture. Appliquée en France avec succès sur des sols limoneux, elle devrait pouvoir être utilisée sans difficulté sous les tropiques sur les sols argileux, notamment les vertisols. Au vu d'essais entrepris en Côte d'Ivoire, cette méthode paraît surestimer l'infiltrabilité des sols sableux.

Signalons également que les auteurs de cette méthode ont obtenu des relations satisfaisantes entre l'évolution du D_{min} et celle de F .

proposed by French workers (Boiffin, 1984; Boiffin and Monnier, 1986), which consists of using droppers to apply water to the soil surface and of measuring the diameter of the shining wet spot formed when it is saturated (Figure 5).

In practice, about 15 capillary tubes of varying lengths are used, fed by three small reservoirs with different heights of water. In this way a fairly wide range of flow rates Q are obtained. These flow rates vary as a function of the temperature and must be determined from a prior calibration. At saturation, generally achieved after 30-40 minutes, the diameter D of the patches remains constant. Ignoring evaporation, infiltration intensity F can be calculated from the formula:

$$F = \frac{40 Q}{\rho D^2}$$

where:

F = the infiltration intensity, in $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$

Q = flow rate of the capillary, in $\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$

D = diameter of the saturated area, in cm .

The fairly high number of repetitions allows the variability of F to be assessed and gives an adequate number of measurements after the elimination of results which indicate adverse conditions, such as the absence of a saturated spot, or the appearance of a puddle or even runoff.

It should be clearly understood that the method can be used only under very humid conditions - after

- b) **Résistance à la pénétration**
 Les croûtes de surface se caractérisent non seulement par une infiltabilité réduite mais aussi par une dureté généralement plus élevée que celle du sol sous-jacent. Ce dernier caractère peut être mesuré à l'aide de pénétromètres. Il s'agit le plus souvent de dynamomètres à ressort (Gabrilides et Alexiadis, 1963 ; Hendrick, 1969) qui requièrent, pour leur utilisation, un certain nombre de conditions :
- Pour chaque mesure, le nombre de répétitions doit être élevé : de 10 à 50 selon la surface de l'embout.
 - Il est impératif de procéder simultanément à des prélèvements d'échantillons - de 3 à 7 - pour déterminer l'humidité du sol en surface. Seule l'étude des variations de la résistance à la pénétration en fonction de l'humidité du sol, voire de la tension, permet des comparaisons fiables.

Analyses et mesures de laboratoire

Les microorganisations :

Ceux qui disposent de l'équipement nécessaire peuvent confectionner des lames minces de croûtes et les observer au microscope. Cette approche apporte des précisions sur les caractères des microhorizons - granulométrie, porosité, arrangement - et sur leur mode de for-

rain during the growing season, for example. Used successfully in France on loamy soils, it should be usable without difficulty in the tropics on clay soils, particularly Vertisols. Trials undertaken in Côte d'Ivoire suggest that the method seems to overestimate the infiltability of sandy soils.

It should also be noted that the authors of this method have obtained satisfactory relationships between the evolution of D_{min} and that of F .

- b) **Resistance to penetration**
 Surface crusts are characterized not only by reduced infiltration, but also by a generally greater hardness than that of the soil below. This characteristic can be measured with penetrometers. These are usually spring dynamometers (Gabrilides and Alexiadis, 1963; Hendrick, 1969), the use of which requires that:
- For each determination, the number of repetitions must be high (10-50 according to the area of the penetrometer head).
 - From 3 to 7 samples must be taken at the same time - to determine the surface soil humidity. Reliable comparisons can be made only when variations in resistance to penetration are studied as a function of soil moisture content.

Analyses and laboratory determinations

Microstructures

Those with the necessary equipment can make thin sections of crusts and examine them under a microscope. This approach gives detailed information on microhorizons - texture, porosity

and arrangement - and on their formation (Bishay et Stoops, 1975; Boiffin et Bresson, 1987; Valentin et Ruiz Figueroa, 1987).

Propriétés et comportements :

- a) **Les tests d'instabilité structurale**
 De très nombreux tests de laboratoire ont été proposés pour évaluer, de manière standardisée et en routine, la sensibilité des sols à l'encroûtement. Après avoir comparé plusieurs d'entre eux, notamment dans le but de prévoir l'érodibilité des sols tropicaux, de Vleeschauwer, Lal et de Boodt (1987) ont conclu que le choix pouvait se porter sur deux d'entre eux : celui proposé par de Leenher et de Boodt (1959) et celui de Henin, Monnier et Combeau (1958). Toutefois, ces tests ont tendance à accentuer les processus d'éclatement, puisque les échantillons sont préalablement séchés à l'air, ce qui a tendance à surestimer le rôle bénéfique de la matière organique (Boiffin, Papy et Payre, 1986). Pour utiles qu'ils soient, ces tests ne remplacent pas le suivi de la dégradation structurale *in situ*.
- b) **Les tests de propriété mécaniques :**
- (1) **Limites de consistance**
 De Ploey et Mucher (1981) ont proposé un indice de consistance qui semble bien refléter la sensibilité des sols à l'encroûtement. Celui-ci est obtenu à partir de la courbe servant à établir la limite de liquidité d'Atterberg. C'est la différence, exprimée en pourcentage d'humidité pondérale, entre les valeurs obtenues après 5 et 10 coups donnés par l'appareil de Casagrande.
 - (2) **Module de rupture**
 Il existe également de nombreuses méthodes de laboratoire pour déterminer la cohésion des croûtes, c'est-à-dire la force qu'il est nécessaire d'exercer pour en provoquer la rupture. En pratique, les me-

and arrangement - and on their formation (Bishay and Stoops, 1975; Boiffin and Bresson, 1987; Valentin and Ruiz Figueroa, 1987).

Properties and behaviour

- a) **Tests for structural stability**
 Very numerous laboratory tests have been proposed to estimate by standardized, routine procedures the tendency of soils to form crusts. After having compared several methods, de Vleeschauwer, Lal and de Boodt (1978) concluded that two of them were to be preferred: that proposed by de Leenher and de Boodt (1959) and that of Henin, Monnier and Combeau (1958). However, these tests have a tendency to emphasize the processes of shattering, because samples are first air-dried, which gives a tendency to overestimate the beneficial effects of organic matter (Boiffin, Papy and Peyre, 1986). Useful as they are, these tests are no substitute for the monitoring of structural degradation *in situ*.
- b) **Tests of mechanical properties**
- (1) **Consistency limits**
 De Ploey and Mucher (1981) have proposed a consistency index which seems to reflect well the susceptibility of soils to crusting. This is derived from the curve which defines the Atterberg liquid limit. It is the difference, expressed in percentage moisture by weight, between values obtained after 5 and 10 blows of the Casagrande apparatus.
 - (2) **Module of rupture**
 There also exist numerous laboratory methods for determining crust cohesion, i.e. the force needed to provoke

sures portent sur des croûtes fabriquées au laboratoire, appelées alors des "briquettes" (Richards, 1948). Les dispositifs les plus récents permettent de maintenir constant la vitesse de pénétration du couteau ou de l'aiguille (Page, 1979). En fait, ces appareils présentent un intérêt pour l'étude fondamentale des différents facteurs de cohésion des croûtes, mais s'éloignent trop des conditions naturelles pour remplacer complètement les mesures de terrain.

Détachabilité et érosion hydrique

Les différentes formes d'érosion

Point n'est besoin d'être un spécialiste de l'érosion pour identifier au champ ses principales formes. Sans entrer dans les détails, il est possible de relever sur le terrain :

- les marques de rejaillissement qui souillent la base des tiges des plantes,
- les figures en piédestal, c'est-à-dire les éléments de sol restés en relief, protégé du rejaillissement par un objet quelconque : feuille, tige, racine, éléments grossiers,
- les traces d'érosion en nappe; celle-ci laisse des dépôts - croûte de ruissellement - et peut provoquer l'apparition de micromarches,
- les griffes, témoins de l'érosion linéaire, qui peuvent être effacées lors de travaux culturaux,
- les ravines, plus profondes, qui affectent les horizons B, voire plus profonds.

L'examen attentif de la surface du sol au cours de la saison de culture fournit de précieuses indications sur les risques érosifs liés à telles ou telles pratiques culturales. Même si cette approche ne fournit pas de données quantifiées sur les pertes en terre, elle peut

shattering. In practice, determinations are on laboratory-produced crusts, termed "briquettes" (Richards, 1948). The most recent equipment maintains a constant speed of penetration by the knife or needle used (Page, 1979). In effect, these devices are useful in the fundamental study of the factors involved in crust cohesion, but are too far removed from natural conditions to replace field measurements altogether.

Detachability and water erosion

The different forms of erosion

It is not necessary to be a specialist in order to identify different types of erosion. Without going into detail, it is possible to note in the field:

- splash marks on the bases of plant stems;
- pedestals, i.e. soil elements which remain raised, protected from splash by some object such as a leaf, a stem, a root, or coarse material;
- traces of sheet erosion, which leaves deposited material (sheet erosion crusts) and can lead to the appearance of microsteps;
- rills, indicating linear erosion, which can be effaced by cultivation;
- gullies, which are deeper, and affect B horizons or even deeper ones.

The careful examination of the soil surface during the cropping season gives valuable indications of the erosion risks associated with this or that cultural practice. Even if this does not give quantitative figures on soil losses, it can serve as a base for very relevant recommendations regarding better soil management.

servir de base à des recommandations très pertinentes pour une meilleure gestion des terres.

Les mesures au champ

En fonction de ses objectifs et de ses moyens, il convient de se fixer une, ou plusieurs échelles de mesures :

- En un point particulier, la pose de repères fixes (tiges métalliques enfoncées dans le sol, ...) donne une estimation de l'épaisseur de terre érodée au cours de la durée des observations.
- La détachabilité, c'est-à-dire l'aptitude des particules à être détachées et transportées sur de courtes distances peut être évaluées sur des microparcelles de ruissellement d'un mètre de long sur un mètre de large. Cette échelle présente l'avantage de permettre le suivi simultané des états de surface et de la détachabilité.
- A l'échelle de la parcelle agronomique, c'est bien sûr la case de ruissellement, telle qu'elle est utilisée à travers le monde, qui permet d'apprécier le mieux l'érosion. De nombreux modèles existent (Hudson, 1971); les plus perfectionnés sont dotés de pluviographes et de limnigraphes. L'opération la plus délicate consiste à calibrer des partiteurs justes et précis.
- Aux échelles plus larges, les mesures de pertes en terre requièrent l'équipement de bassins versants. Il est alors nécessaire d'effectuer de nombreux jaugeages, indispensables pour étalonner les stations de mesures, c'est-à-dire pour déterminer correctement les débits en fonction des hauteurs enregistrées. Cette approche, bien que lourde, s'avère la mieux adaptée en vue de comparer les effets de plusieurs techniques de défrichement sur le ruissellement et l'érosion.

Field observations

In relation to the objectives in view and the means available, it is desirable to establish one or several measuring scales:

- At a particular place the positioning of fixed reference points (metallic pegs inserted into the soil) gives an estimate of the thickness of soil eroded during the observation period.
- The detachability, i.e. the ease with which particles are detached and transported over short distances, can be evaluated on microerosion plots one metre long and one metre wide. This scale has the advantage of allowing both surface conditions and detachability to be monitored simultaneously.
- At the scale of the agronomic plot, it is of course the runoff box, of the sort which is used all over the world, which provides the best way of monitoring erosion (Hudson, 1971); the best are endowed with pluviographs and limnigraphs. The most delicate operation is the accurate precise calibration of the divisions.
- At larger scales, measurements of earth losses require the equipment used with drainage basins. This entails making many measurements, which are indispensable for calibrating measurement stations, i.e. for determining the flow rates correctly as a function of the recorded heights. Although this is a lengthy procedure, it is the most suitable one for comparing the effects of different clearing techniques on runoff and erosion.

Les mesures de laboratoire

Certes, il existe de nombreux dispositifs de laboratoire pour estimer l'érodibilité des sols, mais cette approche, analytique et fondamentale, n'entre pas dans les préoccupations de l'IBSRAM. En revanche, il peut être très intéressant de soumettre à des analyses chimiques et mécaniques les échantillons d'eau et de terre exportées des parcelles.

Dégradations structurales internes

The profil cultural

"Il faut entendre par *profil cultural* l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, les racines des végétaux et les facteurs naturels réagissant à ces actions." (Henin, Gras et Monnier, 1969). Dès lors, tout agronome soucieux de prendre en compte les interactions climat-sol-plante se doit de procéder régulièrement au champ à l'examen de profils culturaux pour :

- s'assurer des effets d'une opération culturale en les confrontant aux objectifs préalablement fixés, et
- étudier les relations entre l'état physique du sol et l'enracinement.

Comment peut-on interpréter les effets d'une fertilisation ou d'une irrigation si l'on ignore par exemple que les racines ont buté sur une semelle de labour, et que les conditions sont devenues rapidement asphyxiantes au-dessus?

Comme pour la description d'un profil pédologique, il convient, lors de l'étude d'un profil cultural, de respecter un certain nombre de règles. Après l'ouverture d'une tranchée plus ou moins longue selon le microrelief et plus ou moins profonde selon le travail du sol, l'observateur utilise une échelle de notation bien définie (Manichon, 1982; Blic, 1987). L'examen porte sur :

Laboratory measurements

There are, to be sure, a number of laboratory methods for obtaining estimates of soil erodibility, but this basic analytical approach is not one of IBSRAM's concerns. On the other hand, it can be useful to subject samples of water and earth from experimental plots to chemical and mechanical analyses.

Internal structural degradation

The cultivation profile

"By cultivation profile is meant the successive layers of earth, individualized by the intervention of cultivation tools, vegetation roots, and natural factors which react to these actions." (Henin, Gras and Monier, 1969). This means that any agronomist genuinely anxious to take into account climate-soil-plant interactions should go regularly to the field and examine cultivation profiles to:

- assess the results of a cultivation operation with regard to previously established objectives;
- study the relationship between the physical state of the soil and the root system.

How can the results of fertilization or irrigation be interpreted properly if, for example, one takes no account of the fact that the roots had come up against a plough pan, and that conditions above it had rapidly become asphyxiating?

As is the case in describing a soil profile, it is advisable when making a cultivation profile to observe a certain number of rules. After digging a pit, whose length will depend on the microrelief and whose depth will depend on the type of cultivation, the investigator should use a carefully defined notation

- les limites verticales et latérales,
- la netteté de ces limites,
- l'identification de figures particulières : type de croûte en surface, lissages, semelles de labour.
- les relations morphologiques de ces traits, ce qui permet d'établir une chronologie, voire une datation précise en fonction du calendrier cultural et des observations précédentes.
- la caractérisation de volumes homogènes, définis par la couleur, la présence de taches, la texture, la structure - notamment la forme et la dimension des agrégats et de mottes - la porosité, la consistance, l'humidité, l'activité faunique.
- l'enracinement, caractérisé par plusieurs paramètres : la densité racinaire (nombre de racines par dm), la régularité, les distributions latérales et verticales. Il importe également de relier l'enracinement aux discontinuités et aux différents volumes du profil : les racines forment-elles un coude au niveau de la semelle de labour, les mottes dures sont-elles pénétrées par les radicelles?

A ces principes, ajoutons quelques recommandations pratiques :

- Outre un couteau, l'observateur doit disposer d'un pinceau et d'un soufflet pour dégager les structures sans les perturber.
- Pour mieux apprécier les limites des volumes, il est souvent utile de dégager plusieurs "marches" à partir de la surface, faisant apparaître ainsi les discontinuités majeures selon la technique des fouilles archéologiques.
- Comme la description d'un profil pédologique, celle du profil cultural se trouve facilitée par l'utilisation d'une fiche préétablie.
- Plus que pour un sol, il est impératif de dresser un croquis du profil cultural sur le terrain ou sont reportées les principales observations (figure 6).

scale (Manichon, 1982; Blic, 1987). The investigation is concerned with:

- vertical and lateral limits,
- the sharpness of the limits,
- the identification of particular features: types of surface crust, shining pressure surfaces, and plough pans.
- the morphological relationships of these features, which will enable a chronology to be established, or even a precise dating in relation to the cultivation calendar and previous observations.
- the characterization of homogeneous material, as determined by colour, the existence of spots, texture, and structure (notably the shape and size of aggregates and crumbs), porosity, consistency, humidity, the activity of fauna, etc.
- root development, as characterized by a number of parameters: root density (number of roots per dm), regularity, and lateral and vertical distribution. It is also important to relate root development to the discontinuities and different layers of the profile. Do roots form an elbow bend on reaching the plough pan? Are the hard aggregates penetrated by small roots?

We can add a few practical recommendations in connection with these principles:

- In addition to a knife, the investigator should also provide himself with a brush and a pair of bellows to disengage the structures without disturbing them.
- In order to get a better idea of the limits of the layers, it is often useful to take out several "steps" from the surface, as is done in archeological digging, so that the main discontinuities can appear.
- As when describing a soil profile, a form should be prepared beforehand to help describe the cultivation profile.

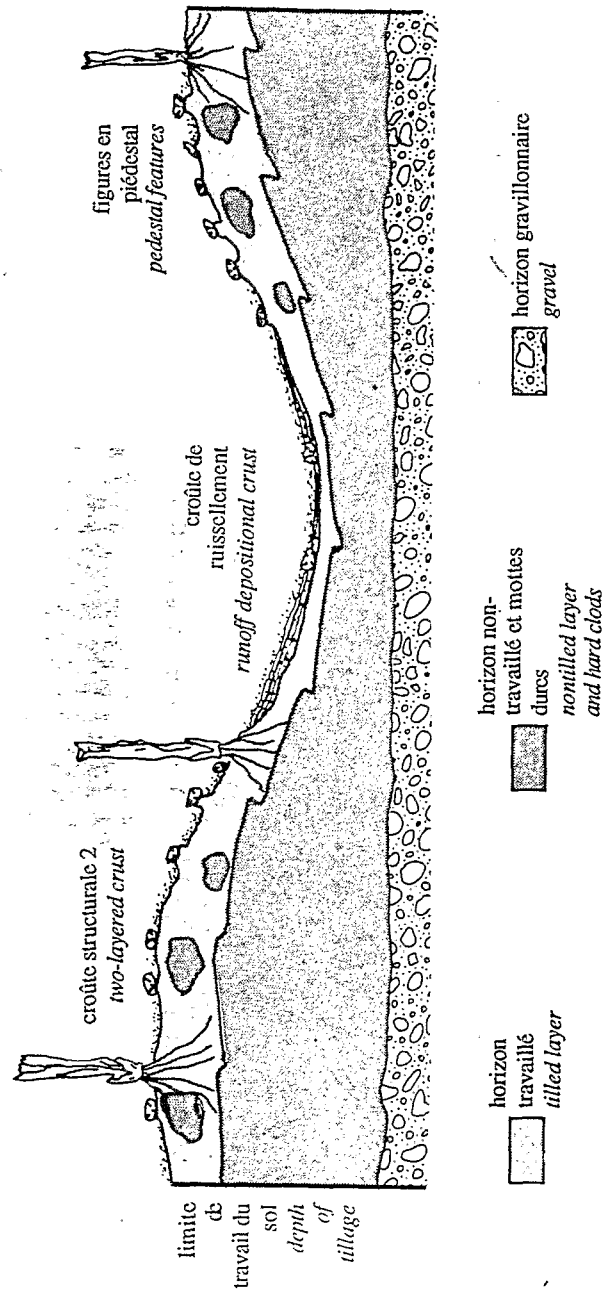


Figure 6. Exemple de profil cultural, un an après défrichement mécanisé et labour billonné. (D'après Mong-Gine, 1979.)
Example of a cultivation profile, one year after mechanical land clearing and plough ridging (From Mong-Gine, 1979).

Les mesures de terrain

Densité apparente

La mesure de la densité apparente des horizons cultivés et sous-jacents permet d'apprécier les variations de porosité dues au travail du sol. Bien que simples, les mesures requièrent le respect de certaines règles simples :

- Dans le cas d'utilisation de la méthode au cylindre, le diamètre et la hauteur de ce dernier doivent être adaptés au volume considéré. Pratiquement le rapport entre la hauteur et le diamètre doit rester compris entre 0,5 et 2 (Audry et al., 1973).
- Le nombre de répétitions dépend de la variabilité du volume considéré, de la taille du cylindre utilisé, et bien entendu du niveau de précision souhaité.
- L'interprétation des données se trouve considérablement enrichies si, au lieu de procéder à des mesures "aveugles", elles sont repérées selon les différents volumes préalablement identifiés lors de l'étude du profil cultural.
- Particulièrement pour les sols cultivés, la densité apparente subit des variations importantes au cours du cycle cultural, ou à plus long terme. Il importe, par conséquent, de situer les mesures non seulement selon la géométrie des horizons cultivés, mais aussi dans le temps, en fonction du calendrier cultural.
- Toute donnée de densité apparente doit être accompagnée :
 - d'une description du sol considéré,
 - du relevé des opérations culturales,
 - du plan d'échantillonnage, et
 - des modalités de traitements statistiques des résultats (Cassel, 1982).

Profils pénétrométriques

Les profils pénétrométriques tradui-

Land measurements

Bulk density

Measurement of the bulk density of the cultivated horizon and those below it gives an idea of the variations in porosity due to working the soil. These measurements, although they are very simple to make, need to be done in accordance with certain simple rules:

- If the cylinder method is used, the diameter and height of the cylinder must be adapted to the soil horizon concerned. In practice, the ratio between the height and the diameter must remain between 0.5 and 2 (Audrey et al., 1973).
- The number of repetitions will depend on the variability of the soil horizon concerned, and of course on the degree of precision required.
- The interpretation of the data will be considerably enhanced if, instead of making random measurements, they are related to previously identified soil horizons defined when the cultivation profile was being studied.
- Especially with cultivated soils, the bulk density undergoes important variations in the course of the cultivation cycle, or over longer periods. It is consequently important to take measurements not only in relation to the geometry of the cultivation horizons, but also in relation to time, as a function of the cultivation calendar.
- Information on bulk density should be accompanied by:
 - * a description of the soil concerned,
 - * a summary of cultivation operations,
 - * the sampling plan, and

sent en termes de résistance à la pénétration la présence de niveaux plus durs, obstacles à l'enracinement. Les instruments utilisés, des pénétromètres à masse (figure 7), permettent de mesurer l'énergie qu'il est nécessaire d'exercer en laissant tomber une masse d'une certaine hauteur pour faire pénétrer une tige à extrémité conique d'une certaine profondeur. Cette résistance peut être calculée à l'aide de la formule empirique "des hollandais" (Billot, 1982) :

* the procedures used for examining the results statistically (Cassel, 1982).

Penetrometer profiles

Penetrometer profiles indicate in terms of the resistance to penetration the presence of harder layers which obstruct root development. The instruments used, hammer penetrometers (Figure 7), measure the energy which needs to be expended when a weight is dropped from a given height to make a rod with a cone-shaped head penetrate the ground to a given depth. The amount of resistance can be calculated by means of the empirical "Dutch" formula (Billot, 1982):

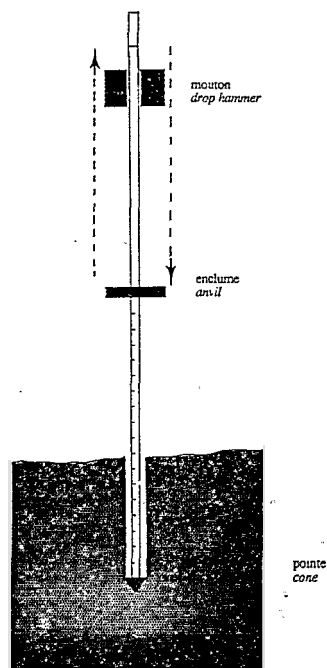


Figure 7. Pénétromètre à masse.
Sketch of hammering penetrometer.

$$R = \frac{M^2 h n}{2 (M + m) S z}$$

avec :

- R: résistance à la pénétration (kg/cm)
- M: masse de mouton (kg)
- m: masse de la tige et de l'enclume (kg)
- h: hauteur de chute de la masse (cm)
- S: section de la pointe (cm)
- n: nombre de coups
- z: enfoncement correspondant (cm)

Plusieurs répétitions sont généralement nécessaires pour obtenir une précision acceptable. Comme pour la résistance à la pénétration en surface, ces mesures doivent être accompagnées de profils d'humidité pour être correctement interprétés.

Tests de laboratoire :

Introduction

Les conditions hydriques déterminent le succès ou l'échec d'un travail du sol. Or, pour certains sols, le choix de la date des travaux qui, au demeurant, résulte d'un grand nombre de contraintes, peut s'avérer très délicat : ou bien on se heurte, en conditions trop sèches, à une énergie trop élevée à fournir, ou bien, en conditions trop humides, on prend des risques importants de lissages et de tassement. Voilà pourquoi il est intéressant de déterminer, pour un type de terre donnée, ces conditions optimales de travail cultural. Combinées aux données climatiques, elles peuvent être traduites en termes de nombre de jours statistiquement favorables au travail du sol. A cet effet, l'agronome dispose de plusieurs tests de laboratoire. Nous ne présenterons ici que le test Proctor, considérant que la détermination des limites d'Atterberg, très utiles, appartient depuis longtemps à la routine de nombreux laboratoires et, qu'à l'inverse, les tests oedo-

$$R = \frac{M^2 h n}{2 (M + m) S z}$$

where:

- R= resistance to penetration (kg/cm)
- M= weight of the hammer (kg)
- m= weight of the rod and anvil (kg)
- h= height from which the weight is dropped (cm)
- S= cross section of the head (cm)
- n= number of blows
- z= depth of penetration (cm)

Several repetitions are generally necessary to achieve an acceptable degree of precision. As is the case for resistance to surface penetration, these measurements, in order to be correctly interpreted, should be accompanied by humidity profiles.

Laboratory tests

Introduction

Moisture conditions determine the success or failure of soil tillage. For certain soils, the selection of the date for the tillage, which by and large involves a large number of constraints, can be a very delicate matter: conditions may either be too dry, in which case the level of energy needed will be too high; or they may be too wet, in which case there will be a serious risk of slipping and compaction. This is why it is useful to determine, for any particular type of land, the best conditions for cultivation. In conjunction with climatic data, these conditions can be expressed in terms of the number of days statistically favourable for tilling. For this purpose, the agronomist has available several laboratory tests. Here we will concern ourselves only with the Proctor test, since the determination of Atterberg limits, although very useful, has long

métriques (Guerif, 1982) requièrent un matériel trop onéreux.

Test Proctor

Emprunté aux Travaux Publics, ce test est utilisé avec profit dans le domaine de la gestion des sols (Yoro, 1976; Blic, 1978; Faure, 1978; Grimaldi, 1986). Le principe en est simple : un échantillon de sol tamisé, apporté à une humidité désirée et contenu dans un moule cylindrique subit une compaction dynamique sous l'effet des coups répétés d'un mouton tombant d'une certaine hauteur. Ce test, on le voit, nécessite un matériel limité et peut être facilement mis en œuvre. Dans le domaine agricole, les conditions standard sont les suivantes (Faure, 1978; Burke, Gabriels et Bouma, 1986) :

- moule : volume 300 cm³, diamètre intérieur 70 mm,
- nombre de couches de remplissage du moule : 3,
- masse du mouton : 1 kg,
- hauteur de chute : 20 cm,
- nombre de coups : 20, ce qui correspond à une énergie de 590 kJm⁻³.

Ce test permet de reporter graphiquement la densité apparente sèche de l'échantillon compacté en fonction de l'humidité (figure 8). La courbe de compactage Proctor fait généralement apparaître deux valeurs particulières de l'humidité :

- W_c , le seuil de sensibilité au compactage. En conditions plus sèches, la densité reste quasi-insensible au compactage. Au-delà de ce seuil, elle augmente fortement.
- W_m , humidité correspondant au maximum de compacité, caractérisé par la densité maximale d_m .

Détermination des gammes d'humidités optimales pour le travail du sol

Les paramètres précédents, associés aux limites d'Atterberg, à la capacité de rétention et au point de flétrissement permettent de délimiter différentes gammes d'humidité. Celles-ci peuvent

been a standard procedure in many laboratories and, on the other hand, oedometric tests (Guerif, 1982) require too much equipment.

The Proctor test

First used by the Ministry of Works, this test can be a useful aid in soil management (Yoro, 1976; Blic, 1978; Faure, 1978; Grimaldi, 1986). The principle is simple: a sieved soil sample, brought to the requisite humidity and placed in a cylindrical mould, undergoes dynamic compaction as a result of repeated blows from a hammer falling from a fixed height. Obviously this test only needs limited equipment and can be set up easily. The following standard conditions are applied when it is used for agricultural purposes:

- mould: 300 cm³ capacity, with an interior diameter of 70 mm
- number of layers for refilling the mould: 3
- weight of the ram: 1 kg
- height of the drop slide: 20 cm
- number of blows: 20, corresponding to an energy output of 590 kJm⁻³.

This test makes it possible to show by the graph the dry bulk density of the compacted sample as a function of humidity (Figure 8). The Proctor compaction curve generally provides two particular humidity values:

- W_c , the threshold value for liability to compaction. In drier conditions, the density is almost unaffected by compaction. Above this threshold, there is a marked increase in density.
- W_m , the humidity which corresponds to maximum compaction, characterized by maximum density d_m .

Determining the optimum humidity range for tillage

The above parameters, in conjunction with the Atterberg limits, the water-

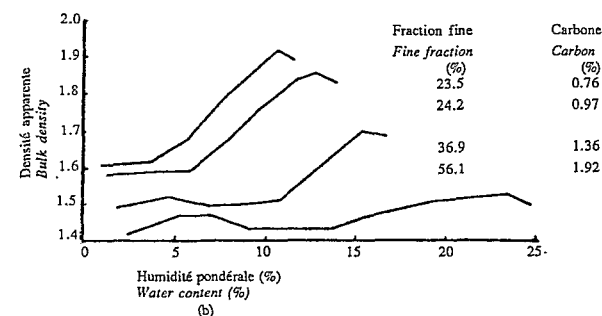
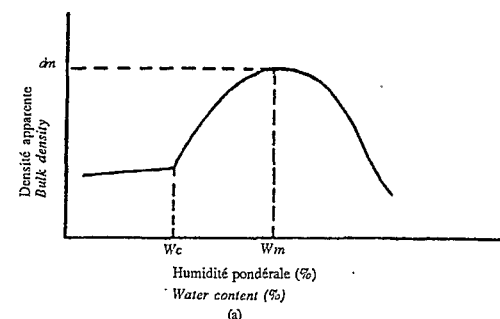


Figure 8. a. Courbe Proctor : variation de la densité apparente après compactage en fonction de l'humidité.
b. Courbes Proctor de différents échantillons de la région centrale de Côte d'Ivoire. On notera l'influence de la fraction fine (<20 μm) et du carbone. (D'après Blic, 1979.)
a. Proctor curve : bulk density after compaction as a function of water content.
b. Proctor curves of selected samples from central Ivory Coast. Note the influence of the fine fraction (<20 μ) and the carbon content. (From Blic, 1979).

faciliter les prises de décisions quant aux interventions culturales (Blic, 1979) :

- *Etat sec* : humidité inférieure au point de flétrissement. Pour les sols ferrallitiques, sablo-argileux, dérivés de granites, c'est l'état qui offre les meilleures conditions d'intervention. En revanche, les sols issus de schistes et de roches vertes présentent, à l'état sec, une cohésion trop forte.
- *Etat frais* : entre le point de flétrissement et W_m . Eventuellement, cer-

holding capacity, and the wilting point, enable us to define different humidity ranges. These values can help us to take decisions regarding the timing of operations (Blic, 1979):

- *Dry state*: humidity less than the wilting point. For ferrallitic sandy-clay soils derived from granite, the dry state is the one which provides the best conditions for cultivation. On the other hand, soils derived from schists

taines opérations peuvent être entreprises sur les sols dérivés de schistes, moins sensibles au compactage que les sols issus de granites.

- *Etat ressuyé* : entre W_m et la capacité de rétention. Les risques de compactage étant maximaux, toute opération culturale, particulièrement le semis et le pulvérisage, doivent être évités.
- *Etat humide* : entre la capacité de rétention et la limite de liquidité. Pour les sols suffisamment argileux (humidité à pF3 supérieure à 14%), les travaux culturaux peuvent être envisagés.
- *Etat très humide* : au dessus de la limite de liquidité. Les risques de dégradation structurale sont trop élevés pour que le sol soit travaillé.

Observations et mesures minimales pour les réseaux IBSRAM

En guise de résumé à ce rapide exposé, et dans le but de lui conférer un caractère pratique, nous dressons la liste des différentes observations et mesures qu'il nous semble indispensable de réaliser dans les deux réseaux de l'IBSRAM présents en Afrique :

- MOVUSAC (■ Vertisols)
- AFRICALAND (² sols acides ; ¥ Défrichement)

Encroûtement

- * Identification des états de surface : avant défrichement (¥), après les semis (■^{a¥}), avant le premier sarclage (■^{a¥}), avant la récolte (■^{a¥}).
- * Caractérisation de l'état structural initial : après les semis (■^{a¥}).

and greenstones are too cohesive in their dry state.

- *Moist state*: between the wilting point and W_m , the moisture content at which maximum compaction occurs. After a certain length of time, some operations can be carried out on soils derived from schists, which are less affected by compaction than granite-derived soils.
- *Very moist state*: between W_m and field capacity. Since the risks of compaction are greatest in this state, any cultivation operation - especially sowing and spraying - should be avoided.
- *Wet state*: between field capacity and the liquid limit. On soils with a sufficiently high clay content (humidity at pF3 above 14%), tillage can be undertaken.
- *Very wet state*: above the liquid limit. The risks of structural degradation are too high for tillage operations to be carried out.

Minimal observations and measurements for IBSRAM networks

To sum up this brief account, and to give it some practical value, we will list the various observations and measurements which seem to be indispensable for the two IBSRAM networks in Africa:

- MOVUSAC (■ Vertisols)
- AFRICALAND (² acid soils ¥ land clearing)

Surface crusts

- * Identification of surface features: before clearing (¥), after sowing (■^{a¥}), before the first weeding (■^{a¥}), before harvest (■^{a¥}).
- * Characterization of the initial structural state: after sowing (■^{a¥}).

- * Suivi du D_{min} : après les semis jusqu'au développement complet de la croûte structurale (■^{a¥}).
- * Evaluation de l'infiltrabilité par la méthode des taches saturées : au maximum de saturation (■).

Ruissellement et érosion (¥)

- * Mise en place de 9 parcelles d'érosion, d'au moins 10 m de long correspondant à 3 répétitions pour les traitements suivants :
 - défrichement intermédiaire x absence de travail du sol,
 - défrichement intermédiaire x travail minimum,
 - défrichement mécanisé x labour.

Dégradations internes du profil cultural

- * Description de l'état structural avant et après défrichement (¥), et lors de la récolte (²¥).
- * Profils pénétrométriques et de densité apparente avant et après défrichement (¥), et lors de la récolte (■^{a¥}).

Conclusion

Au terme de cet exposé, trois points essentiels méritent d'être soulignés :

- *Les contraintes physiques* requièrent une attention au moins aussi importantes que les contraintes chimiques. Intervenant sur l'infiltration de l'eau dans le sol, les échanges gazeux, la levée des semences, l'enracinement, l'activité biologique, elles conditionnent largement les diverses composantes du rendement.
- *C'est sur le terrain* que ces contraintes peuvent être mises en évidence. Dans ce domaine, à l'encontre de la fertilité chimique, le laboratoire à lui seul ne fournit qu'une partie des données. S'il désire collaborer avec l'agronome, le pédologue ne doit-il pas apporter sa

- * Monitoring of D_{min} : after sowing until the development of the structural crust is complete (■^{a¥}).
- * Evaluation of the infiltrability using the saturated spots method: at maximum saturation (■).

Runoff and erosion (¥)

- * Establishment of nine erosion plots, each at least 10 m long, corresponding to 3 repetitions for the following treatments:
 - intermediate clearing x no tillage
 - intermediate clearing x minimum tillage
 - mechanical clearing x ploughing

Internal degradations of the cultivation profile

- * Description of the structural state before and after clearing (¥), and at harvest (²¥).
- * Penetrometer and bulk density profiles before and after clearing (¥), and at harvest (■^{a¥}).

Conclusion

Finally, three essential points should be emphasized:

- *Physical constraints* need at least as much attention as chemical constraints. They play a part in water infiltration into the soil, gas exchange, seed emergence, root development, and biological activity, and hence have a very important effect on the various yield components.
- These constraints can only be seen clearly *in the field*. For physical constraints, unlike chemical fertility, the laboratory by itself can only provide partial data. A soil scientist who wishes to collaborate with an agrono-

compétence première, c'est-à-dire celle de l'étude du sol, au champ?

- Les observations et les mesures doivent être repérées dans l'espace et dans le temps. Ces deux dimensions constituent le canevas sans lequel il serait impossible de mettre en évidence la moindre relation. Seul le suivi d'une dynamique, bien située dans l'espace pédologique, fournit les moyens de comprendre les processus et donc de proposer des recommandations quant à la gestion rationnelle des sols.

mist needs to contribute his primary skill, namely that of studying the soil in the field.

- Observations and measurements need to be located in both space and time. These two dimensions make up the framework without which it would be impossible to show even the smallest relationship. It is only by following the changes, which take place within the spatial framework of pedology that we can understand the processes involved and hence make recommendations for rational soil management.

Bibliographie

References

- AUDRY, P., COMBEAU, A., HUMBEL, F.X., ROOSE, E. et VIZIER, J.F. 1973. *Essai sur les études de dynamique actuelle des sols*. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols. Paris: ORSTOM. 126p., multigr., n 2, + annexes.
- BILLOT, J.F. 1982. Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. *Science du Sol, Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol* 3:187-202. 12 réf., 11 fig.
- BISHAY, B.G. and STOOPS, G. 1975. Micromorphology of irrigation crusts formed on a calcareous soil of the mechanized farm north-west Egypt. *Pédologie* 25(2):143.
- BLIC, Ph. de. 1978. *Morphologie et comportement mécanique des sols de la région centre en culture semi-mécanisée*. Adiopodoumé : A.V.B./ORSTOM. 63p., 30 fig., 9 réf., + annexes.
- BLIC, Ph. de. 1987. Analysis of a cultivation profile under sugarcane : methodology and results. Pages 275-285 in: *Land Development and Management of Acid Soils in Africa II*, eds. M. Latham and P. Ahn. Proceedings of the 2nd Regional Workshop, Lusaka, and Kasama, Zambia, 9-16 April 1987. IBSRAM Proceedings no. 7. Bangkok: IBSRAM.
- BOIFFIN, J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse, Paris. 320p. + annexes.
- BOIFFIN, J. and MONNIER, G. 1985. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. Pages 210-217 in: *Assessment of soil surface sealing and crusting*, eds. C. Callebaut, D. Gabriels and M. de Boodt. Belgium: University of Ghent.
- BOIFFIN, J. et BRESSON, L.M. 1987. Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. Pages 393-400 in: *Micromorphologie des sols*. Paris: AISS/AFES. 2 tabl., 3 fig., 13 réf.
- BOIFFIN, J. PAPPY, F. et PEYRE, Y. 1986. *Systèmes de production, système de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux*. INAPG/INA/Ministère de l'Agriculture. 154p. + annexes.
- BURKE, W., GABRIELS, D. and BOUMA, J. 1986. *Soil structure assessment*. Rotterdam: Balkema. 92p.
- CASENAVE, A. et VALENTIN, C. 1988. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Abidjan: ORSTOM. 187p. + annexes.
- CASSEL, D.K. 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. Pages 45-67 in: *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*. Madison WI: ASA, SSSA.
- CASTA, P., CHOPART, J.L., JANEAU, J.L. et VALENTIN, C. A paraître. Sensibilité à l'encroûtement superficiel et aptitude au ruissellement d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. *Agronomie Tropicale*.
- DE LEENHEER, L. and DE BOODT, H. 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight-diameter. Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, Ghent, 1958. *Mededelingen Landbouw Gent* 24:290-300.
- DE PLOEY, J. and MÜCHER, E.J. 1981. A consistency index and rainwash mechanisms on Belgian loamy soils. *Earth Surface Processes* 6:319-330.
- DE VLEESCHAUWER, D., LAL, R. and DE BOODT, M. 1978. Comparison of detachability indices in relation to soil erodibility for some important Nigerian soils. *Pédologie*, 28(1):5-20.
- FAURE, A. 1978. Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse, Doctorat ès Sciences, Université de Grenoble. 179p.
- GABRILIDES, S.T. and ALEXIADIS, C.A. 1963. Some measurements with simple soil penetrometer. *Journal of Agricultural Engineering Resources* 8:262-266.
- GRIMALDI, M. 1986. Modifications structurales d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Science du Sol, Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol* 24(3):269-284. 1 tabl., 6 fig., 20 réf., 2 annexes.
- GUERIF, J. 1982. Comportement au compactage d'un massif d'agrégats. Effet de la teneur en eau et de la pression exercée. *Agronomie* 2(3):287-294.
- HENDRICK, J.G. 1969. Recording soil penetrometer. *Journal of Agricultural Engineering Resources* 14(2):183-186.

- HENIN, S., GRAS, R. et MONNIER, G. 1969. *Le profil cultural*. Masson, Paris, 2^e édition. 332p.
- HUDSON, N.W. 1971. *Soil conservation*, ed. Batsford. London. 320p.
- JOHNSON, C.B., MANNERING, J.V. and MOLDENHAUER, W.C. 1979. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Science Society of America Journal* 43(4).
- LAFFORGUE, A. et NAAH, E. 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cahiers ORSTOM Série Hydrologie* 13(3):195-237.
- MANICHON, H. 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse, Paris. 214p. + annexes.
- MONG-GINE, Th. 1979. Mise en culture et interactions eau-sol-plante : étude de trois sites en région ferrallitique de savane (Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire.) Adiopodoumé: ORSTOM. 83p. multigr., 13 tabl., 36 fig., 47 réf.
- PAGE, E.R. 1979. The effect of poly (vinylalcohol) on the crust strength of silty soils. *Journal of Soil Science* 30(4):643-651.
- POSS, R. et VALENTIN, C. 1983. Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation. Une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola, Côte d'Ivoire). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* 20(4):341-360. 12 tabl., 8 fig., 22 réf.
- RICHARDS, L.A. 1948. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 17:321-323.
- VALENTIN, C. 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3^e cycle, Université de Paris VII. *Etudes et Thèses, ORSTOM*. 259p.
- VALENTIN, C. and 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. Pages 401-408 in: *Micromorphologie des sols*. Paris: AISS/AFES. 5 tabl., 4 fig., 14 réf.
- YORO, G. 1976. Mesure de la sensibilité des sols au tassement en fonction de leur humidité. Recherche d'une méthode permettant d'opérer sur de petits échantillons de terre tamisée. Application à la comparaison de quelques matériaux différents. D.E.A. de pédologie et d'aménagement des sols. Université de Paris VII, 1976. 28p.

Information system report

During the training workshop, Professor Rudi Dudal of the University of Leuven outlined his proposals for developing IBSRAM's information service, which will be one of the major components of the network support system. The following account is based on the report of a one-month consultancy undertaken by Professor Dudal, and indicates briefly his main recommendations on the creation of an IBSRAM information service.

Background

IBSRAM's task is to promote and test soil management technologies through networks of cooperating national institutions. Its programme is strongly decentralized and spread over a great number of cooperators. They work in strikingly different environments where access to information and basic data is often limited and where adequate data-processing facilities are not available.

Since IBSRAM's information system is meant to enhance the research capacity of its networks and cooperators, its scope and design should be geared to an 'in-house' service. In the first instance, it will be necessary to set up a central facility and headquarters. However, when the methodology is worked out and the operational experience is acquired, it is desirable that the information function should be progressively decentralized to the regional centres and the networks.

Tasks of the information unit

In its five-year plan, IBSRAM envisages an information unit with multiple tasks:

- an information system related to soil resources and management;
- publicity on improved soil management technologies;
- dissemination of scientific material related to soil management;
- dissemination of general information on IBSRAM's activities;
- assistance to network coordinators in organizing workshops;
- assistance in the preparation of annual reports, technical monographs, and training manuals;
- the preparation of a scientific journal;
- dissemination of IBSRAM's general communications;
- the promotion of information to extension officers and farmers.