

Étude expérimentale de l'érosion hydrique de sols représentatifs de l'Afrique de l'Ouest (1)

1. Présentation des sites expérimentaux Méthode et identification des processus élémentaires Analyse et comparaison des régimes de ruissellement

Jean COLLINET

Pédologue ORSTOM, 5, route de Bitche, 67110 Niederbronn Les Bains

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur une analyse expérimentale des ruissellements et des érosions observés, sous simulation de pluies, à partir de l'exploitation de parcelles expérimentales installées depuis les régions sahéliennes jusqu'aux régions tropicales humides de l'Afrique de l'Ouest.

Dans la première partie, l'auteur résume les caractéristiques essentielles des milieux et des couvertures pédologiques des sites, présente les méthodes d'analyse permettant une identification des processus élémentaires des ruissellements et des érosions. Comme l'érosion résulte du produit « intensité de ruissellement $\times$ charge solide », on commence par établir une comparaison latitudinale des régimes de ruissellement. Il apparaît que la conductivité hydraulique des surfaces des sols départage nettement les régions sahéliennes, soudaniennes aux ruissellements importants des régions guinéennes aux ruissellements modérés. La limite entre ces comportements régionaux est relativement nette, elle dépend moins des types de couvertures pédologiques que de la modification des activités biologiques, intenses et durables dans le sud, faibles et trop courtes, dans le nord, pour pouvoir remanier les colmatages superficiels issus, dans les deux cas, des contraintes d'origine pluviale.

Dans la deuxième partie, l'analyse, consacrée aux dynamiques érosives, retient les paramètres les plus susceptibles d'influencer l'érosion. Alors que les infiltrations, donc les ruissellements, dépendent beaucoup de l'organisation des sols, les érosions sont surtout liées à leurs constituants. Ceci explique une forte dispersion de résultats à travers les différents domaines pédologiques et les difficultés d'y dégager des érodibilités spécifiques. Les effets du splash et de la capacité érosive des courants de ruissellement varient avec la granulométrie, la nature minéralogique des argiles, la stabilité structurale des agrégats. Des seuils de réaction se manifestent qui mettent en évidence le rôle

(1) Ce travail a été réalisé en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso et au Niger de 1975 à 1980. Les activités de terrain ont été menées avec les collaborations de J. ASSELINE, P. CHEVALIER, G. DUBOIS, R. DUMAS, A. LAFFORGUE, P. LEDUC, B. POUYAUD, E. ROOSE, M. SICOT, C. VALENTIN, G. VUILLAUME. Les analyses portant sur les échantillons de sols, de terres érodées, d'eaux de ruissellement ont été effectuées dans les Laboratoires d'Analyses du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) dirigés par M. GOUZY. Les lames minces de sol ont été réalisées dans le Laboratoire de Pétrographie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé dirigé par C. HANRION. Les analyses par diffraction de rayons X ont été faites à l'Institut de Géologie de Strasbourg, dans le Laboratoire dirigé par P. LARQUE

intercepteur d'énergie de l'épaisseur de la lame ruisselante, donc des caractéristiques des averses mais aussi de toutes causes susceptibles de modifier la mésotopographie des sols.

Dans la troisième partie, l'auteur résume les schémas évolutifs des érosions et des infiltrations sur les interfaces les plus caractéristiques du transect étudié en relation avec les remaniements subis par la surface du sol et plus particulièrement en démontrant le rôle des concentrations plasmiques laminaires sub-superficielles contrôlant la conductivité hydraulique des sols et par conséquent leur détachabilité, donc leur érosion.

MOTS-CLÉS : Erosion hydrique — Ruissellement — Détachabilité — Splash — Organisations pelliculaires superficielles — Croûtes — Simulation de pluies — Burkina Faso — Haute-Volta — Niger — Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF WEST AFRICAN SOIL EROSION

Runoff and erosion are studied on representative soils of West Africa with a rainfall simulator acting on 92 experimental plots set from the sahelian to the humid tropics.

In a first part, are summarized the essential characteristics of natural environment and pedological covers. Research methods are starting from primary data given by hydrograph and sédigraph utilization, they permit to identify the elementary and general process of infiltration, runoff and erosion. As erosion is a result of runoff intensity and soil particles detachment, one begin by setting a latitudinal comparison of different storm runoff coefficients. Concerning the general behaviours of isohumic, ferruginous, ferrallitic soils, it appears that an important attention must be given to the hydraulic conductivity of the top soil structure which explains higher runoffs in sahelian and soudanian areas (Kr # 70 %), and the lower in guinea ones (Kr # 25 %). The limit between these two behaviours is relatively contrasted. It correspond, in fact, to a most durable vegetation cover, particularly to a crowded root layer, and also to soil fauna activity increasing near humid tropics and reshaping soil sealings. So, soil characteristics seem to be less important than biological dynamics because superficial hydrodynamics are especially depending on soil arrangement.

In the second part, dealing with erosion dynamics, one identify the different parameters which are influencing soil particles detachment and erosion capacities of runoffs. On a first analysis scale, it appears that erosion varies in a large proportions (from a factor 10 in isohumic pedological fields to a factor 150 in the ferruginous and ferrallitic ones). Even though infiltrations are depending on soil arrangement, erosions are depending on soil materials. On a second analysis scale, the most influencing parameters of erosion are studied : rainsplash and runoff erosion capacity effects are depending on soil particles distribution, former soil moisture, clay mineralogy and topographical slope. Trends of reactions reveal the part of surface runoff depth interception and also, all reasons which can modify microtopography of soils. For these reasons it seems quite impossible to connect soil erodibility to any soil taxonomy system.

As this study shows the important part of top-soil features a micromorphological study permits (third part) to understand why and how thin plasmic microlayers development control, at higher or lower level, the general soil conductivity, through top soil samples collected, for micromorphological research, before, during and after rainfall simulation. Finally, infiltration and erosion schemes are proposed to explain the principal west african soils hydrodynamical and erosion behaviours.

KEY WORDS : Rainsplash erosion — Sheet erosion — Infiltration — Runoff — Soil particles detachment — Soil crusting — Soil sealing — Rainfall simulation — Burkina Faso — Upper Volta — Niger — Ivory Coast.

INTRODUCTION

L'étude de l'érosion hydrique en Afrique intertropicale suit, depuis une trentaine d'années, deux trajectoires différentes dans ses méthodes et ses échelles de mesures ce qui modifie la nature et la portée des résultats obtenus.

Une première méthode, expérimentale, consiste à

installer un réseau de parcelles de quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés, fournissant des informations globales sur les quantités d'eaux ruisselées et de terres érodées. Ces parcelles, exploitées pendant plusieurs années, possèdent des dimensions fixées au départ et se caractérisent par des pentes topographiques et des sols plus ou moins immuables pendant la durée des essais. Les intensités des phénomènes obser-

vés y dépendent des conditions pluviométriques, des traitements culturels subis ou de la dynamique saisonnière des couverts végétaux naturels, mais, du fait de leurs dimensions, les érosions observées et mesurées n'y excèdent pas, ou peu, le stade d'une ablation en rigole, ou « rill erosion » des auteurs anglo-saxons (MORGAN, 1980 - BRYAN, 1987).

La seconde méthode, plus exhaustive, se propose d'évaluer, et éventuellement de cartographier à petite échelle, les risques d'érosion spécifique de vastes régions en s'appuyant sur des corrélations établies par compilations d'informations concernant les caractéristiques pluviométriques, topographiques régionales et les charges solides livrées par les grands bassins fluviaux (FOURNIER, 1962 et 1967 — FAO, 1980). Les érosions calculées de cette façon, se rapportent alors à des phénomènes normaux estompant les influences des exacerbations locales.

Elles comportent toutes les formes d'érosion, dont les incisions linéaires des cours d'eau ainsi que les charriages de fond de lit. Par contre, les éléments mobilisés sur les versants, mais non transmis au réseau, ne sont pas pris en compte. Les effets des variations des couverts végétaux sont succinctement abordés car ils dérivent d'informations climatiques générales.

L'étude présentée dans cette série d'articles s'inscrit dans la première trajectoire ; elle connaît donc trois limites :

— la première limite est conceptuelle, l'étude n'aborde, en effet, que les aspects de la dynamique actuelle des sols liés aux phénomènes de circulation superficielle de l'eau, du détachement et du transport d'éléments solides et pseudo-solubles et aussi les effets de ces processus sur l'évolution des sols,

— la deuxième limite est spatiale ; dans l'érosion hydrique continentale, cette étude porte sur le premier maillon du cycle de l'eau, elle concerne les quelque 10 à 100 m² de superficie de sol où se forment les ruissellements, où les particules sont détachées et exportées ; cette échelle peut cependant être franchie lorsque les informations deviennent suffisamment cohérentes, entre sites expérimentaux voisins, pour pouvoir aborder la dynamique d'un versant,

— la troisième limite est inhérente à la méthode utilisée : il s'agit en effet d'une étude expérimentale de terrain réalisée en condition de contraintes pluviales contrôlées ; on est alors confronté d'une part à la représentativité des mesures et d'autre part, au problème du droit à l'extrapolation des données dans l'espace et dans le temps.

S'il faut rester conscient des limites précédentes, il apparaît cependant que la simulation de pluie permet de dépasser le stade des bilans globaux à petite échelle, relativement peu informatifs, et d'accéder aux mécanis-

mes intimes de la genèse des ruissellements, de la mobilisation et du transport des particules du sol. Cette méthode permet des essais répétitifs en maîtrisant les nombreux paramètres intervenant simultanément sous les averses naturelles. Elle rend possible la multiplication des situations expérimentales en ce qui concerne les types de couvertures pédologiques, les couverts végétaux et les façons culturales.

Ce meilleur contrôle des événements pluviaux et des situations expérimentales facilite la comparaison latitudinale des comportements hydrodynamiques et érosifs et permet d'identifier les volumes de sols réellement concernés par les processus expliquant leur actuelle différenciation.

1. LES SITES EXPÉRIMENTAUX DANS LEURS MILIEUX NATURELS

Les essais se sont déroulés dans sept régions naturelles de trois pays, sur vingt six sites expérimentaux représentant une centaine de parcelles (fig.1).

Par site expérimental, il faut entendre une portion d'interfluve représentatif d'un paysage par la nature de ses sols, de ses couverts végétaux, du profil du versant et de son utilisation actuelle par l'homme, la différenciation des sols pouvant quant à elle, résulter d'une évolution toposéquentielle ou être reliée à une géoséquence. Les différents sites sont ainsi caractéristiques de couvertures pédologiques et d'environnements naturels répartis depuis les 14°37' (Oursi, dans le nord du Burkina Faso) jusqu'au 5°20' de latitude Nord (Taï, dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire).

1.1. Matériaux originels

Le transect est caractérisé par une relative homogénéité des formations géologiques en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso où prédominent les roches ignées cristallines et cristallophylliennes précambriennes. Les particularités pétrographiques expliquent cependant les différences de modelé donc, en partie, les dynamiques actuelles de chaque site : granites et micaschistes de Taï (Côte d'Ivoire), granites et pegmatites de Sakassou, Korhogo (Côte d'Ivoire), Loumbila (Burkina Faso), syénites à intercalations de séricitoschistes sur Pouni, de quartzites sur Saint Paul, de chloritoschistes sur Batanga (Burkina Faso), gabbros, amphibolites, granites calcoalcalins sur Oursi (Burkina Faso).

Les sites de Galmi (sud Niger) furent par contre installés sur les séries du bassin sédimentaire occidental du Niger où les vigoureuses érosions différentielles passées révèlent, sous le plateau gréseux ferruginisé du Continental Terminal post-Eocène, les affleurements des marnes et calcaires du Crétacé supérieur des versants.

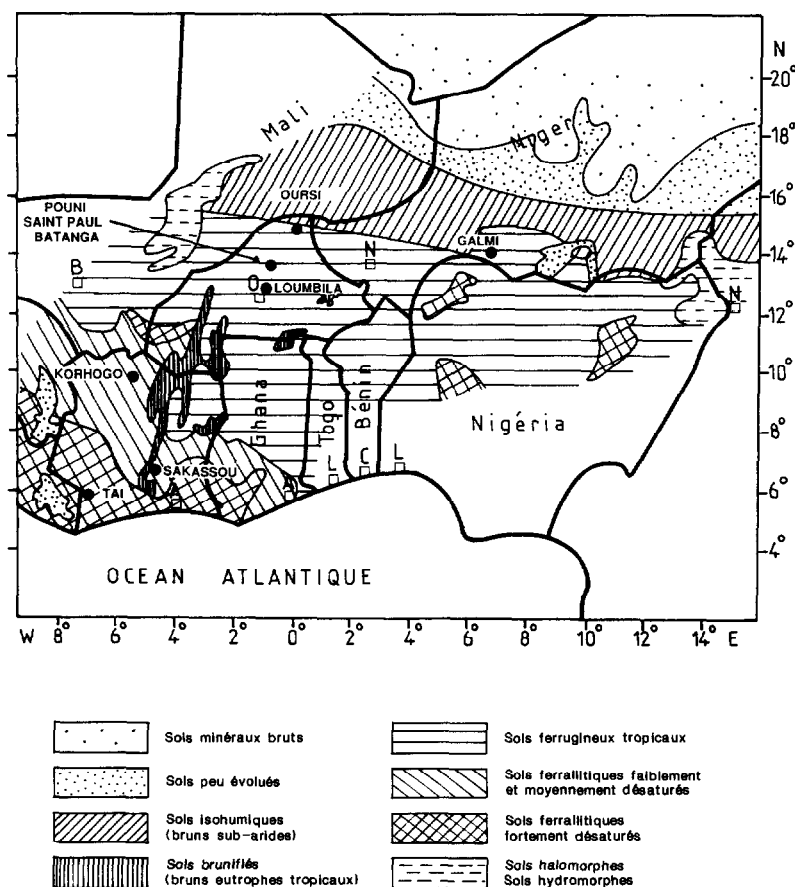


FIG. 1. — Localisation des sites expérimentaux et esquisse des domaines pédologiques

Dans le nord, des placages éoliens Quaternaire recouvrent çà et là les matériaux précédents (sites d'Oursi 1 et de Galmi 3 par exemple).

1.2. Régions climatiques

Le transect s'étend à travers différentes régions climatiques depuis l'isohyète 450 mm (Galmi et Oursi) jusqu'à l'isohyète 2000 mm (Taï) et couvre ainsi les régions sahéennes, soudaniennes et guinéennes (fig.2).

Dans la distribution latitudinale des régimes climatiques, il convient de retenir :

- le passage d'un régime à une saison des pluies à un régime à deux saisons vers le Centre de la Côte d'Ivoire, soit vers 8° de latitude Nord,
- une inflexion importante de l'isohyète 1200 mm jusqu'à moins de 100 km des côtes atlantiques en Côte d'Ivoire, particularité qui explique, partiellement, une descente importante de la limite forêt-savane dans une région localement dénommée « le V baoulé »,

— des variations pluviométriques interannuelles de plus en plus importantes vers le nord (30 % de coefficient de variations vers les 15° Nord), ce qui perturbe le développement des cultures,

— de fortes variations latitudinales de durées des averse de faible intensité, une homogénéité par contre plus nette pour les fortes intensités.

L'établissement de bilans hydriques décennaux, mensuels et annuels permettent d'intéressantes comparaisons à petite échelle (tableau I), mais cette information reste théorique, déjà en ce qui concerne le choix des formules permettant d'évaluer ETP et encore plus lorsqu'il s'agit d'évaluer l'évolution des réserves hydriques utilisables avec le développement des systèmes racinaires.

Si l'on considère les informations contenues dans le tableau I, un drainage nul existerait au nord des 14°30' où pourtant mil et sorgho germent et se développent. Seules des analyses à pas de temps plus courts pourraient rendre compte de l'utilisation d'apports hydriques

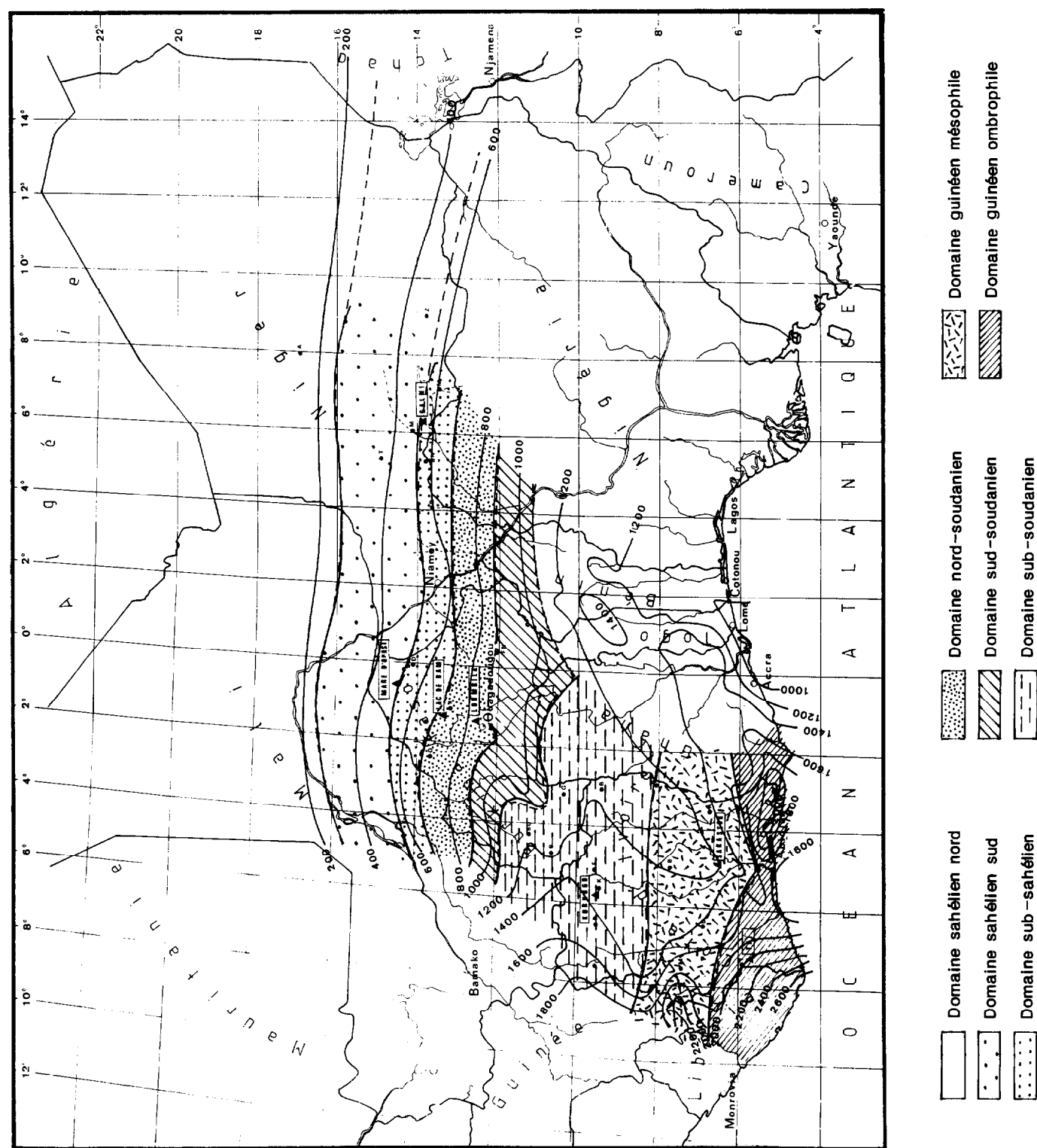


FIG. 2. — Carte des isohyètes et des domaines climatiques de la Côte d'Ivoire, du Burkina Faso, du Niger

TABLEAU I
Bilans hydriques annuels théoriques des différents sites

STATIONS 1	SITES 2	PLUIE 3	ETP 4	DEF 5	EXC 6	RES 7
Tahoua 14°50'	GALMI	385	2263	1872	0	0
Oursi 14°37'	OURSİ	463	2791	2328	0	0
Kongoussi 13°20'	POUNI, ST- PAUL, BATANGA	689	2306	1657	40	1,8 (94)
Ouagadougou 12°21'	LOUMBILA	875	1905	951	333	2,0 (199)
Ferkesse- Dougou, 09°35'	KORHOGO	1350	1618	596	328	4,0 (298)
Dimbokro 06°39'	SAKASSOU	1208	1574	395	30	4,0 (298)
Tai 05°25'	TAI	1923	1312	158	769	8,0 (804)

col.3 : P = pluviométrie moyenne annuelle (mm)

col.4 : ETP = évapotranspiration potentielle « TURC » moyenne annuelle (mm)

col.5 : DEF = déficit hydrique annuel cumulé (mm)

= ETP — ETR, avec ETR = évapotranspiration réelle annuelle cumulée, $ETR \leq ETP$, liée au taux de remplissage des réserves hydriques du sol

col.6 : EXC = eau excédentaire (mm) après remplissage des réserves hydriques utilisables par les plantes

col.7 : RES = nombre de mois où les réserves sont totalement emplies et, entre parenthèses, eau annuellement disponible pour les plantes

fractionnés. D'autre part, les pondérations entrant dans la détermination des réserves utilisables estompent les mini-différenciations pédologiques superficielles et ne rendent pas compte de la méso-topographie pouvant favoriser l'accumulation d'eau provenant d'impluvium amont comme c'est le cas pour l'hydrodynamique particulière des « brousses tigrées » (LEPRUN, 1978).

1.3. Couvertures pédologiques

On s'est efforcé de rechercher la meilleure représentativité possible des sites à l'intérieur des trois domaines pédologiques traversés (fig.1) en combinant observations personnelles et exploitation des informations contenues dans les nombreux travaux antérieurs : GAVAUD (1977), BOCQUIER et GAVAUD (1984) pour le Niger ; BOULET (1968, 1976, 1978), KALOGA (1968), LEPRUN et MOREAU (1968) pour le Burkina Faso ; de BOLSSEZON *et al.* (1971), PERRAUD (1971), ESCHENBRENNER *et al.* (1978), COLLINET (1974), BEAUDOU *et al.* (1980), LÉVÊQUE (1982), POSS (1981) pour la Côte d'Ivoire.

On découvre, vers les 15° Nord la bande est-ouest des sols isohumiques (sites d'Oursi et de Galmi), passant vers l'isohyète 700 mm au domaine composite des sols ferrugineux (Pouni, Saint Paul, Batanga, Loumbila) où s'associent et se juxtaposent jusqu'à proximité

de l'isohyète 1300 mm de nombreuses couvertures pédologiques dont on ne comprendrait pas les interrelations sans une distinction des causes anciennes et actuelles dans l'évolution de systèmes aboutissant à l'actuelle configuration des sols. Dans ce deuxième domaine, l'alternance des couvertures essentiellement kaolinitiques ou essentiellement montmorillonitiques et les conditions de leurs équilibres sont commandées par l'épaisseur des troncatures passées dans les très vieilles altérations ferrallitiques et dans les roches mères ainsi que par les conditions de drainage prévalant dans ces matériaux originels.

Aux couvertures d'altération montmorillonitiques, en équilibre entre 800 et 1000 mm, aux couvertures kaolinitiques, soit « fossilisées » par les cuirasses ferrugineuses et alumino-ferrugineuses, soit en équilibre et évoluant dès lors en système éluvial (« filtre » amont quartzeux) — illuvial (accumulation smectitiques aval), succédant, vers 1300 à 1400 mm, les couvertures kaolinitiques stables du domaine ferrallitique qui couvrent la majeure partie de la Côte d'Ivoire.

1.4. Modelés

Du nord au sud, la distribution des types de paysages est schématisée sur la figure 3.

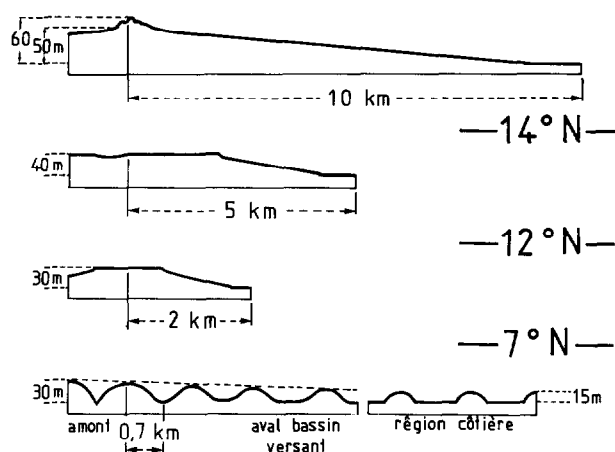


FIG. 3. — Types d'interfluves des zones sèches aux zones humides

Au nord des 14° N, prédominent de vastes mailles interfluves à sommets étroits délimités par de longs versants rectilignes de quelque 10 km d'extension et de pentes < 1 %, les écoulements sont temporaires et le réseau hydrographique y est très dégradé.

Au sud des 7° N, l'écoulement est permanent, le découpage du réseau est dense et actif, il détermine un maillage en collines à versants convexes à convexo-concaves où des segments peuvent avoir des pentes > 25 %, les mailles ne dépassent guère 1,5 km. L'incision des vallées est variable car elle dépend de la proximité des niveaux de base locaux et du profil en long du réseau principal qui est souvent irrégulier avec une succession de biefs calmes interrompus par des rapides.

Il n'est pas possible de suivre une éventuelle évolution morphologique continue (morcellement) entre ces deux extrêmes car ils sont séparés, sur quelque 800 km, par une région où l'évolution géomorphologique dépend essentiellement de la plus ou moins forte résistance des plateaux à indurations ferrugineuses et aluminoferrugineuses plus ou moins massives, épaisses et continues.

On conçoit dès lors que la dynamique actuelle des versants puisse être très variée d'un domaine pédo-bioclimatique à l'autre. Vers le nord, du fait de l'extension des interfluves, l'évolution des sols a de fortes chances d'être géoséquentielle, et ce, aux dépens d'une mosaïque de matériaux originels. Vers le sud l'exiguïté des mailles rend plus probable l'homogénéité des matériaux originels, les évolutions deviennent toposéquentielles et chaque modelé fonctionne comme un système autonome.

2. IDENTIFICATION DES TRAITS PÉDOLOGIQUES ESSENTIELS POUR LA PRÉVISION DES COMPORTEMENTS

Le tableau II récapitule les caractéristiques analytiques et morphologiques des sols sur lesquels furent installés les différents sites. Parmi les traits pédologiques susceptibles d'interférer sur les comportements hydrodynamiques et érosifs, on peut retenir 7 caractéristiques principales :

2.1. Texture

Si l'on regroupe les sols développés sur une même famille de roche, soit par exemple ceux des sites Oursi 3, Loubila 1, Korhogo 1, 2 et 3, Taï 1 et 3, tous issus de l'altération de granites, on constate que la pédoplasation différencie nettement les pôles les plus sableux dans le domaine isohumique des pôles argilo-sableux à argileux dans le domaine ferrallitique.

Cette partition respecte les modalités des altérogénèses évoquées précédemment ainsi que celles d'ultérieurs processus de pédoplasation peut-être liés à la dessiccation des épipédons (CHAUVEL, 1977). Les apports éoliens, actuels ou plus anciens renforcent cette tendance en contaminant les horizons superficiels dans les zones sahéliennes.

Les variations verticales de texture sont la règle sous toutes les latitudes sauf dans les sols vertiques. Il est vraisemblable que des causes variées aboutissent à la même « image » du profil : un appauvrissement détecté dans les régions sahéliennes peut résulter, ou être renforcé par l'apport de sables allochtones tandis que l'entraînement hydrique superficiel ou profond est le processus pouvant être essentiellement invoqué en région humide.

Contrairement à certaines considérations rapides, mais parfois encore bien ancrées (sable = perméabilité), la texture n'a pas d'influence directe sur l'hydrodynamique ; c'est plus par les types d'assemblages méso- et micromorphologiques que favorise la composition granulométrique qu'elle intervient dans la nature et la capacité des réservoirs (dynamique profonde), et dans la genèse des organisations de la surface contrôlant, pro parte, la conductivité hydraulique (dynamique superficielle).

2.2. Charge en éléments grossiers

Lorsqu'elle est constituée de nodules sesquioxydiques, cette charge résulte d'héritages morphogénétiques dans les domaines ferrugineux et ferrallitiques ; ces charges sont moins fréquentes dans le domaine isohumique.

Les épandages gravillonnaires sont généralement envahissants dans le domaine ferrugineux ; ils se limitent, par contre, plus souvent aux sommets des interfluves dans

TABLEAU II
Résumé de quelques données descriptives des sols et de leurs surfaces (état naturel)

SITES		PENT.	TEXT.	MORG.	ETAT DES SURFACES				CLASSIFICATION
1		2	3	4	5				6
					a	b	c	d	
OURSI	1	1,5 - 3,3	4 - 12	0,4	4	96	0	50	Isohumique brun rouge sub-aride
	2	0,4 - 0,5	24 - 39	0,9	75	15	10	28	Isohumique brun sub-aride vertique
	3	0,7 - 1,0	5 - 45	0,5	34	66	0	7	Ferrugineux tropical lessiv. hydrom.
GALMI	1	0,6	10 - 18	0,4	27	61	12	10	Ferrugineux tropical peu lessivé
	2	2,8	20 - 37	1,2	11	81	8	51	Isohumique brun-rouge sub-aride
	3	3,5	7 - 15	0,5	6	94	0	52	Isohumique brun sub-aride
	4	1,9	30 - 36	1,8	45	55	0	13	Isohumique brun sub-aride vertique
POUNI	1	7,5	26 - 61	1,3	60	0	40	10	Peu évolué non climatique d'érosion
	2	2,5	24 - 53	2,5	20	10	70	30	Ferrugineux tropical appauvri modal
	3	0,9	18 - 44	1,4	95	0	5	5	Ferrugineux tropical peu lessivé
ST PAUL	1	4,5	7 - 14	1,0	80	10	10	10	Peu évolué non climat.éros. lithique
	2	2,6	7 - 27	0,7	50	50	0	30	Ferrug. trop. lessiv. concrét. hydrom.
BATANGA	1	1,4	30 - 41	1,4	95	0	5	40	Brun eutrophe tropical vertique
LOUMBILA	1	1,4	7 - 18	1,0	45	28	27	5	Ferrugineux tropical appauv. induré
KORHOGO	1	1,5	20 - 50	1,0	64	31	5	10	Ferrallitique moyen, désaturé typique
	2	3,5	16 - 53	2,7	50	0	50	15	Ferrallitique moyen, désaturé remanié
	3	3,5	16 - 53	2,7	50	0	50	15	Ferrallitique moyen, désaturé remanié
	4	2,5	-	-	45	15	40	20	Ferrallitique moyen, désaturé induré
	5	2,5	4 - 44	0,4	10	90	0	15	Hydromorphe minéral à pseudogley
SAKASSOU	1	2,3	10 - 26	1,1	-	-	3	15	Ferrallitique moyen, désaturé remanié
	2	3,7	14 - 31	1,7	-	-	10	15	Ferrallitique moyen, désaturé remanié
	3	4,5	4 - 14	1,2	-	-	0	25	Hydromorphe minéral à pseudogley
	41	3,8	8 - 33	1,4	-	-	0	30	Ferrallitique moyen, désaturé typique
	42	2,8	8 - 33	1,4	-	-	0	30	Ferrallitique moyen, désaturé typique
TAI modal	1	19,8	40 - 60	5,7	-	-	58	60	Ferrallitique fort, désat. remanié
	2	7,3	22 - 41	2,4	-	-	0	60	Ferrallitique fort, désat. appauv. ind

col.2 : pente topographique (%) — col.3 : argile maximum des horizons A et B (%) — col.4 : matière organique entre 0 et 10 cm (%) — col.5 : occupation de la surface du sol par : .a : des pellicules de battance ou de décantation ; .b : des voiles sableux ; .c : des éléments grossiers ($\phi > 2,0$ mm) ; .d : recouvrement par des débris végétaux (%) — col.6 : classification des sols (C.P.C.S.)

le domaine ferrallitique humide. Cette différence d'extension influe nettement sur l'hydrodynamique des versants pour peu que leur densité soit suffisante.

2.3. Nature minéralogique des argiles

Les domaines isohumiques et, pro parte, ferrugineux, aux argilogenèses illitiques et smectitiques s'opposent au domaine ferrallitique à argilogenèse surtout kaolinitique. Cette différenciation latitudinale a deux répercussions : sur la variation saisonnière des volumes apparents des réservoirs poreux des sols à argile gonflante (sous-groupe vertique des sols isohumiques et bruns tropicaux), sur la formation des organisations pelliculaires superficielles et sub-superficielles.

2.4. Structuration

Le degré de développement de la structure et la stabilité des agrégats ne présentent pas de différences systématiques de la région sahélienne à la région soudanienne. On constate par contre un affinement des structures fragmentaires et une augmentation des taux d'agrégats stables à l'eau (HENIN et MONNIER, 1956, 1969) vers les régions guinéennes et ce, même dans les horizons profonds où les actions biotiques deviennent faibles. Les risques de dégradation chimique des structures liée à des charges excessives en magnésium, sont plus marqués dans les domaines isohumiques et ferrugineux tropicaux ; il en résulte un processus saisonnier de prise en masse, donc de compaction des horizons soumis aux alternances d'humectation et de dessiccation.

2.5. Matière organique et enracinement

Les zones de steppes herbeuses des milieux arides s'opposent nettement aux zones des savanes humides et, a fortiori, aux zones forestières par les traits suivants :

- très faibles teneurs en composés humiques profondément incorporés dans le domaine isohumique,
- teneurs moyennes (savanes humides) à fortes (forêt ombrophile) en composés humiques, concentrés essentiellement dans les premiers décimètres du sol.

L'enracinement suit une évolution latitudinale similaire, sa densité et sa répartition sont liées aux contraintes hydriques en zone sèche, au cycle très superficiel des éléments minéraux en zone humide.

Les recrûs par germination prédominant en zone sahélienne, le tallage ne prend de l'importance qu'à partir de la région sud-soudanienne, soit vers les 12° N. La densité des recrûs n'augmente nettement que vers les 10° N correspondant au domaine sub-soudanien des savanes boisées (P # 1100 mm, Isodéficit # 900 mm réparti sur 8 mois). Un chevelu racinaire dense et pérenne ne se développe qu'à partir du domaine

guinéen mésophile, soit vers les 8°30'N (P de 1200 à 1400 mm, Isodéficit de 400 à 600 mm sur 5 à 6 mois) (PERRAUD, 1971). Ce chevelu racinaire constitue alors une armature efficace contre l'érosion en nappe. On fait souvent état d'une corrélation positive entre la stabilité structurale et le taux de carbone organique ; en fait, ce sont essentiellement les composés humiques les plus polymérisés et l'humine qui interviennent dans la stabilité des agrégats. Aussi, en Côte d'Ivoire, par exemple, les caractéristiques structurales sont-elles généralement meilleures dans les savanes pré-forestières et dans les forêts mésophiles que dans les zones forestières ombrophiles du sud (PERRAUD, 1971 — de BOISSEZON, 1973 — MOREAU, 1978 — LEROUX, 1980 — BOYER, 1982).

2.6. Organisations superficielles

Les subdivisions présentées dans le tableau II en pellicule d'éléments fins, voiles sableux, épandages d'éléments grossiers sont, certes, sommaires ; elles correspondent cependant aux grandes familles d'organisations superficielles découvertes au nord des 9°. Au sud, il apparaît que l'activité biotique devient suffisamment intense et durable pour contrarier, en milieu naturel, la formation de ces organisations, ou tout au moins, les remanier totalement à l'issue de leur constitution.

2.7. Couvert végétal

Les taux de recouvrement présentés en colonne 5d du tableau II concernent, depuis Oursi jusqu'à Sakassou, soit des débris végétaux couchés sur la surface du sol, soit des débris encore érigés. Dans ce second cas, il s'agit le plus souvent de chaumes graminéens à faible pouvoir intercepteur ; par contre les 60 % de recouvrement des sites de Taï contiennent une grande partie de plantes vivantes (adventices et recrûs) à structure foliaire horizontale plus interceptrice.

A l'échelle régionale, on sait qu'une différence importante de type de recouvrement s'opère à partir de la région guinéenne car la végétation y devient pérenne tandis que plus au nord, l'interception de l'énergie n'est assurée que pendant 3 à 6 mois de l'année par un couvert clairsemé. En début de saison des pluies, l'action protectrice est liée à un mulch de débris, mais sa densité, donc son efficacité, varient en raison de multiples causes d'exportations (consommation par le bétail, utilisation comme matériau de construction, etc.). Un problème similaire se rencontre dans la région guinéenne mésophile où la densité de biomasse serait suffisante pour assurer une protection équivalente à celle d'un couvert forestier ombrophile mais où les coutumes (feux de brousse) aboutissent à créer des niveaux de risque parfois voisins de ceux des régions septentrionales.

3. MÉTHODE ET IDENTIFICATION DES PROCES-SUS ÉLÉMENTAIRES

Le simulateur de pluies utilisé (type Swanson) arrose une superficie de 200 m² à l'intérieur de laquelle sont installées deux parcelles de ruissellement et d'érosion de 50 m². Différents réglages permettent d'obtenir, sur la surface du sol, des averses homogènes de 25 à 120 mm/h. L'énergie cinétique des averses a été analysée, calculée puis pré-réglée en reliant la distribution des diamètres de gouttes aux classes d'intensité ainsi qu'en mesurant et en pré-réglant leur vitesse d'impact (VALENTIN, 1979). Les protocoles expérimentaux tiennent compte des conditions pluviométriques locales et notamment de la répartition des durées d'averses par classes d'intensité (BRUNET MORET, 1963, 1966).

Le dépouillement des limnigrammes, enregistrés au niveau des deux cuves collectant les eaux ruisselées, permet de tracer les hydrogrammes de ruissellement et d'infiltration. Pour une averse de durée et d'intensité données, permettant le développement complet des différentes phases caractéristiques du ruissellement, l'hydrogramme de ruissellement présente 4 parties (fig.4).

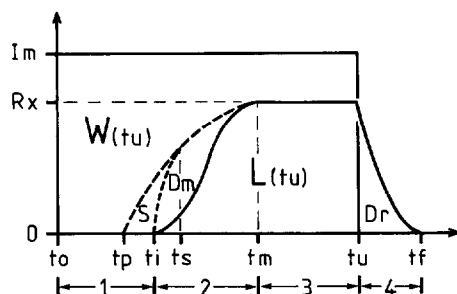


FIG. 4. — Hydrogramme de ruissellement obtenu sous simulation de pluies

(1) une phase d'imbibition de t_0 à t_i pendant laquelle l'intensité d'infiltration de la parcelle est supérieure à l'intensité de la pluie et pendant laquelle, çà et là commencent à se remplir les dépressions du sol,

(2) la portion en S de la courbe traduit ensuite 3 faits :

- une diminution croissante de l'intensité d'infiltration sur la parcelle (F en mm/h),
- une augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau en mouvement sur la parcelle (D_m en mm),
- la poursuite du remplissage et le débordement des dépressions du sol (S en mm), à partir de t_s , toute la superficie de la parcelle ruisselle avec une intensité qui continue à augmenter,

(3) dès l'instant t_m , s'instaure un régime permanent d'infiltration correspondant à un régime permanent de ruissellement, la lame d'eau ruisselante est alors continue, soit parce que la parcelle est plane, soit parce qu'il s'établit un film homogène d'eau de pluie sur une parcelle non plane. L'intensité de cette pluie est alors en tous points supérieure à la conductivité hydraulique maximum du sol, il en résulte les paliers R_x et F_n (mm/h) d'intensités de ruissellement et d'infiltration jusqu'à l'arrêt de l'averse,

(4) dès l'arrêt de l'averse, à partir de t_u , la lame ruisselée se départage entre ce qui continue à s'infiltrer et ce qui parvient au canal de ruissellement (D_r en mm), c'est la phase de vidange.

Cet hydrogramme fournit les données brutes à l'origine de toutes les analyses ultérieures (D_r , F_n , R_x , P_i = hauteur de la pluie d'imbibition, en mm, W = lame infiltrée, en mm, L = lame ruisselée, en mm, ainsi que K_i et K_r %, les coefficients d'infiltration et de ruissellement correspondants).

4. ANALYSE ET COMPARAISON DES RÉGIMES DE RUISSELEMENT

4.1. Choix des paramètres, analyse des informations fournies

Une comparaison des comportements hydriques des sols peut être fondée sur l'analyse des lames ruisselées unitaires ou cumulées à condition de savoir comment les variations de hauteur de ces lames se relient aux différentes phases caractéristiques du ruissellement (fig.4) ; pour cela, il devient préférable de considérer le ruissellement comme un « refus d'infiltration ». L'hydrogramme d'infiltration, présenté sur la figure 5, se décompose en différentes phases déduites de l'hydrogramme de ruissellement pour une averse d'intensité constante.

En (1) (phase d'imbibition), comme le régime d'alimentation en eau est inférieur à l'infiltrabilité du sol, l'eau percole aussi vite qu'elle est fournie : c'est alors le régime d'alimentation qui détermine le régime d'infiltration,

En (2) (phase transitoire), le régime de l'alimentation dépasse l'infiltrabilité du sol : c'est alors l'infiltrabilité du sol qui détermine le régime d'infiltration.

Sur un sol initialement sec, la décroissance monotone du régime d'infiltration de t_0 à t_m obéit assez bien à la loi de HORTON (1940) comme des études antérieures l'ont vérifié tant en région guinéenne (LAFFORGUE, NAAH, 1976 — LAFFORGUE 1977), qu'en région soudanienne et sahélienne (COLLINET, LAFFORGUE, 1979) :

$$F(t) = F_n + (F_0 - F_n) e^{-kt}$$

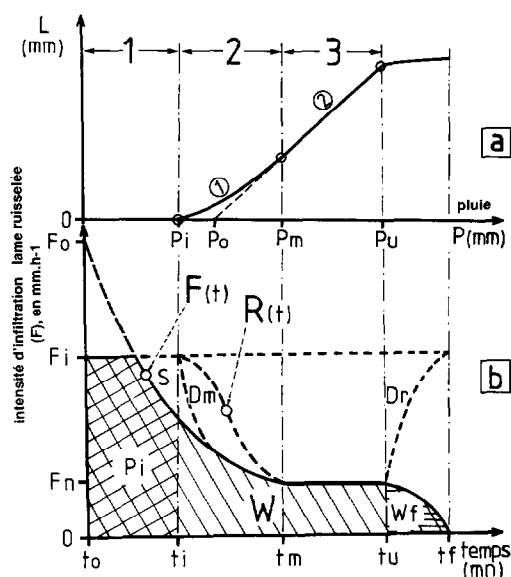


FIG. 5. — (a) Hydrogramme d'infiltration pour une averse simulée et (b) lame ruisselée correspondante

avec F_0 = infiltrabilité maximum du sol en mm.h-1
 F_n = infiltrabilité finale, en mm.h-1
 k = terme constant pour une situation-sol donnée
 t = temps écoulé depuis le début de la pluie, en mm.

Dans le cas où l'infiltrabilité du sol est contrôlée par la totalité du profil humide, le régime d'infiltration est sous la dépendance de différents facteurs aux effets déjà connus par les travaux de HENIN *et al.* (1960), FEDOROFF (1969, 1970), HILLEL (1974), il s'agit essentiellement :

- de l'état d'humectation préliminaire du sol,
- dans un sol de texture et de structure homogènes, du gradient de succion matricielle, donc de la profondeur atteinte par le front d'humidification,
- dans un sol hétérogène, de la nature et de l'ordre de succession des barrières hydrauliques que constituent les interfaces d'horizons modifiant : a) les tensions matricielles liées au diamètre des pores (potentiel matriciel), b) les charges hydrauliques constituées au-dessus des interfaces (potentiel gravité + pression),
- des difficultés de dégazage du sol, donc des durées de ressuyage entre deux averses consécutives, facteur particulièrement mis en évidence dans les savanes humides de Côte d'Ivoire (COLLINET, 1988). Dans ce premier cas, il paraît normal de privilégier les analyses des phases (1) et (2) de la figure 5.

L'infiltrabilité du sol peut aussi être contrôlée dès la surface. Ce contrôle est parfois lié, pour certains sols ferrallitiques d'altitude, à l'hydrophobie temporaire des

agrégats superficiels (CASNAVE *et al.*, 1982). Cependant, plus fréquemment, il s'agit d'une dégradation des structures superficielles suivie d'une imperméabilisation des surfaces (HILLEL, GARDNER, 1969 — ROOSE, 1977, 1981 — de PLOEY, 1978, 1980 — VALENTIN, 1981 — CASNAVE, VALENTIN, 1988 — COLLINET, 1988). La phase transitoire est alors très courte et l'on est alors amené à privilégier l'analyse de la phase suivante, indiquée (3) sur la figure 5. L'infiltrabilité finale (F_n) correspond à l'asymptote de l'hyperbole décrivant la phase précédente ; l'analyse d'un grand nombre de résultats montre cependant que, d'une averse à la suivante, F_n peut également varier :

- d'une part avec l'intensité de la pluie (LAFFORGUE, 1977 — COLLINET, VALENTIN, 1979),

- d'autre part avec le cumul des averses modifiant les caractéristiques hydrauliques de la surface de la même parcelle (VALENTIN, 1981 — COLLINET, 1988) et ceci mérite quelques explications. Lorsque F_n est une fonction croissante de l'intensité de la pluie, c'est parce que la perméabilité de la parcelle est hétérogène (fig.6b) ; en effet, si, en certains points, l'intensité de la pluie est plus élevée que l'intensité d'infiltration, on observe un refus d'infiltration d'intensité maximum $Im - F_n = R_x$ et ce, sur une superficie $p\%$ telle que :

$$R_x = p (Im - F_n)$$

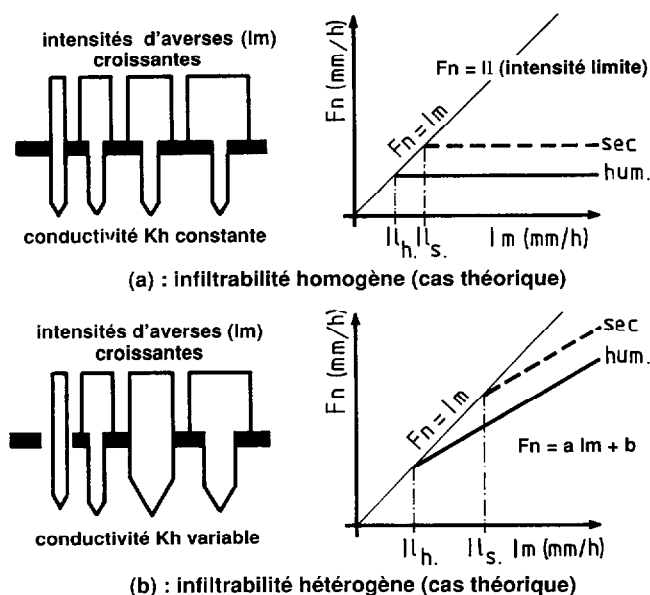
avec Im = intensité moyenne de l'averse (en mm.h-1), et F_n = intensité d'averse limite provoquant le premier ruissellement, ou encore, intensité limite théorique minimale de ruissellement (en mm.h-1).

Ce ruissellement peut, par contre, être absorbé dans les zones 1 — p plus perméables, soit totalement, lorsque l'intensité de l'averse est en deçà de cette intensité limite du ruissellement, soit partiellement, pour des averses d'intensité supérieure à F_n . L'adsorption des ruissellements locaux excédentaires par les zones à forte perméabilité va aller en diminuant au fur et à mesure de l'augmentation des intensités des averses.

Cette hétérogénéité de perméabilité a plusieurs origines : micromodèle naturel ou artificiel (travail du sol), répartition et structure des couverts végétaux, épandages d'éléments grossiers, évolution de la structure, donc de la conductivité de la surface, évolution de la géométrie de la surface liée à l'érosion (cisaillement) ;

Lorsque F_n est une constante, il peut s'agir de deux choses (fig.6a) :

- la parcelle possède d'emblée une perméabilité homogène, ce qui est le cas de sols remarquablement plans, dénudés, lissés sur lesquels se constitue rapidement une lame continue couvrant la totalité de la parcelle ($p = 1$),
- la perméabilité est hétérogène comme dans le cas précédent, mais l'intensité de l'averse dépasse d'emblée la perméabilité du sol et, généralement, la précision du dispositif ne permet pas de détecter la courte phase pendant laquelle F_n est une fonction croissante de Im .

FIG. 6. — Relation entre les intensités finales d'infiltration (F_n) et les intensités des averses (I_m)

La figure 7 illustre le cas d'une parcelle à perméabilité initialement hétérogène s'homogénéisant avec le cumul des averses :

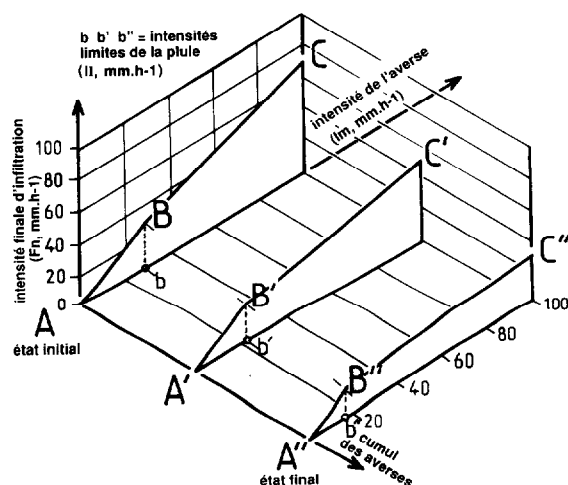


FIG. 7. — Evolution de la conductivité hydraulique avec le cumul des averses (Oursi 1)

— lors des premières averses à intensités variables, sur un sol initialement sec, on observe la situation ABC dans l'espace $F_n(I_m)$,

— en fin d'essais, sur sol humide, la situation A''B''C'' indique une diminution générale de F_n par saturation hydrique mais le gauchissement de la surface A B C C''B''A'' indique aussi une diminution de la conductivité hydraulique de la surface avec le cumul des énergies des averses.

Sur l'exemple retenu (Oursi 1), la diminution de la conductivité est essentiellement due aux réorganisations porales des premiers centimètres : on a en effet vérifié d'une part que le réservoir sol était loin d'être saturé (mesures humidimétriques), et l'on a suivi, d'autre part, l'évolution des structures intimes des premiers centimètres (méso- et micromorphologie).

Cette évolution des organisations structurales superficielles est schématisée sur la figure 8, elle sera reprise et analysée plus en détail dans la 3^e partie. Cette schématisation est excessive car le colmatage subsuperficiel est rarement total sur l'ensemble de la parcelle. Il est, par exemple, contrarié à l'aplomb des touffes de graminées résiduelles (zone sèche), il est saisonnièrement remanié par la faune du sol (zone humide). Enfin, l'« effet parcelle » intègre, sur quelque dizaines de mètres carrés, les différences de régime d'infiltration entre les zones colmatées et les zones épargnées par le processus schématisé précédemment.

L'intégration de la loi d'infiltration de t_0 à t_f , permet d'exprimer la lame d'eau infiltrée (W en mm) à un instant quelconque ou encore de représenter la lame ruisselée de t_i à t_f en fonction de la hauteur de pluie utile (P_u en mm).

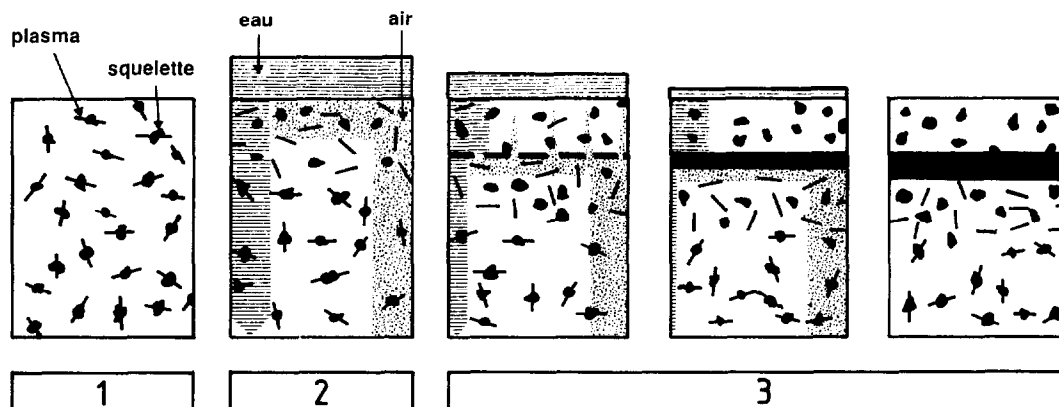


FIG. 8. — Evolution microstructurale des organisations superficielles (ex. des sols sablo-argileux)

1 : Etat initial, liaison plasma (argile) — squelette (quartz)

2 : Phase transitoire et régime permanent du ruissellement, dislocation des liens plasmiques dans un milieu sursaturé, dégazage bloqué

3 : Fin d'averse, tarissement du ruissellement, dégazage et rassemblement des particules plasmiques en une lame continue et étanche vers — 1 à — 3 cm.

Cette lame ruisselée totale est tracée sur la figure 5a :

$$L = \int_{t_0}^{t_u} R(t) dt + Dr$$

A intensité constante d'averse, un changement de variable permet d'exprimer L en fonction de Pu avec :

$$t_u = \frac{Pu}{I_m}$$

et d'obtenir la courbe représentée sur la figure 5a. On constate que pour $t_u > t_m$, cette courbe est rectiligne et a pour équation :

$$L = a (Pu - b) \quad \text{avec } a = \frac{Rx}{I_m}$$

Si l'on considère les portions de parcelle où l'intensité de la pluie est supérieure à l'intensité d'infiltration (p %), et l'intensité d'averse limite (II), on a aussi :

$$a = p \left(1 - \frac{II}{I_m} \right)$$

$$\text{d'où} \quad L = p \left(1 - \frac{II}{I_m} \right) (Pu - b)$$

La pente « a » dépend de l'intensité de l'averse (I_m). Le terme constant « p » est lié aux caractéristiques hydrodynamiques de la parcelle (sol, traitement cultural, pente). « II » varie avec les conditions d'humectation préalables des sols. L'abscisse à l'origine « b » représente, en quelque sorte, la hauteur de précipitation théorique limite du ruissellement (désignée par P_0 sur la figure 5a). Lorsque le protocole permet d'atteindre le régime final d'infiltration (ou permanent de ruissellement), et si l'on assimile le régime transitoire à une droite en prolongeant vers le bas le segment rectiligne (2), on constate que l'erreur par défaut commise sur L, déjà faible pour des sols initialement perméa-

bles, est très faible à nulle pour les sols peu perméables, à instauration rapide du régime permanent.

Pour comparer les régimes de ruissellements générés par la succession des averses simulées sur les différents sites expérimentaux, on a suivi l'évolution des coefficients de ruissellement calculés à partir des coefficients de l'équation exprimant les lames ruisselées cumulées (SL, mm) en fonction du cumul des hauteurs de précipitation (SPu, mm) :

$$SL = \alpha (Spu - \beta)$$

où α et β ne sont plus des caractéristiques pures des parcelles car ils subissent l'influence des protocoles expérimentaux, cependant, l'approximation introduite en passant des lames ruisselées individuelles aux lames cumulées reste satisfaisante compte tenu d'une diminution générale des phases transitoires avec le cumul des averses.

Les coefficients moyens de ruissellement (KRu %) se déduisent de l'équation précédente :

$$KRu = 100 \alpha \left(1 - \frac{\beta}{Spu} \right)$$

Pour chaque situation expérimentale et pour chaque site, l'évolution des coefficients de ruissellement est ensuite exprimée en fonction des érosivités cumulées des pluies simulées (SEV, en joules. $m^{-2}.mm$), substituées à SPu pour n'utiliser que la dimension énergétique des averses, donc insister sur les transformations opérées sur les surfaces des sols.

4.2. Comparaison latitudinale des régimes de ruissellement

Les blocs diagrammes des figures 9, 10, 11 et 12 représentent les évolutions latitudinales des régimes

de ruissellement avec le cumul des érosivités. Chaque figure regroupe les réactions des sols de textures voisines et présentant des situations expérimentales identiques. Les différents plans $KRu(SEV)$ s'ordonnent le long d'un axe « latitude » qui possède la particularité de refléter également :

- la différenciation pédoclimatique des couvertures pédologiques et notamment celle de la nature minéralogique des argiles,
- la structure et la dynamique des couverts végétaux, et de l'enracinement pour les sites en leur état naturel,
- les modifications de l'activité de la faune et ses conséquences sur la structure du sol.

Pour faciliter les comparaisons, les érosivités cumulées sont arrêtées à 1000 joules.m⁻².mm, ce qui corres-

pond à la situation interannuelle moyenne de Taï (P # 2000 mm/an), mais ce qui est évidemment moins réaliste pour les sites septentrionaux dont les érosivités moyennes annuelles (SEV joules.m⁻².mm) sont résumées ci-dessous :

	Oursi	Galmi	Pouni	Loumbila	Korhogo	Sakassou	Taï
SEV	225	300	330	425	650	625	1000

4.2.1. SOLS SABLEUX, EN LEUR ÉTAT NATUREL (fig.9)

Les coefficients moyens de ruissellement chutent brutalement au sud du parallèle 11°N, limite nord de la région sub-soudanienne qui reçoit environ 1100 mm de précipitations et où l'alimentation hydrique des couverts

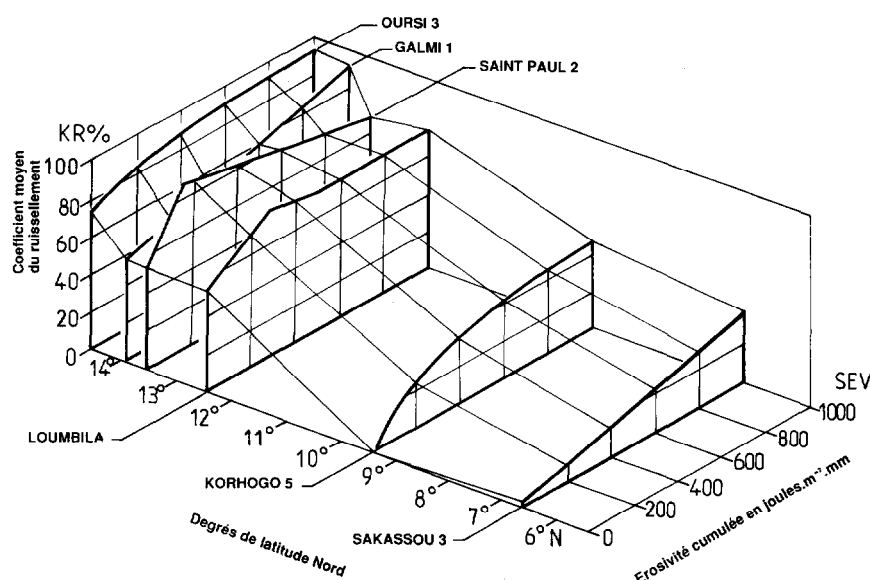


FIG. 9. — Evolution latitudinale des régimes de ruissellement avec le cumul des érosivités — Sols sableux, naturels, moins de 5 % d'éléments grossiers

est assurée pendant 3 mois de l'année (# 300 mm). Dans ces conditions, une bonne partie des recrûs se reconstitue par tallage et leur densité devient suffisante pour améliorer l'infiltrabilité des sols tant par diminution du contrôle de conductivité des surfaces que par approfondissement du profil annuellement humidifié.

Les régimes des sols sahéliens s'opposent nettement à ceux des sols des régions guinéennes mésophiles : si l'on considère en effet les relations $KRu(SEV)$ spécifiques par site, on constate que dans le nord s'instaurent rapidement des ruissellements importants (# 70 % pour des érosivités de 200 à 300 points). Dans le sud, les régimes augmentent progressivement jusqu'à des valeurs palier de # 40 % sur Korhogo ($SEV = 650$) ou # 25 % sur

Sakassou ($SEV = 625$), indiquant d'une part un faible contrôle de conductivité par les surfaces, d'autre part un drainage profond dans des profils aux caractéristiques structurales et granulométriques homogènes.

On remarquera que Saint Paul 2 présente un cas de réouverture des porosités superficielles par destruction des organisations pelliculaires et parfois par cisaillement de la parcelle au-delà de 200 points d'érosivité.

4.2.2. SOLS SABLEUX LABOURÉS (fig.10)

La faible évolution latitudinale des régimes de ruissellement confirme les remarques précédentes quant au rôle des facteurs biotiques : l'élimination des couverts végétaux, et surtout l'extirpation des systèmes raci-

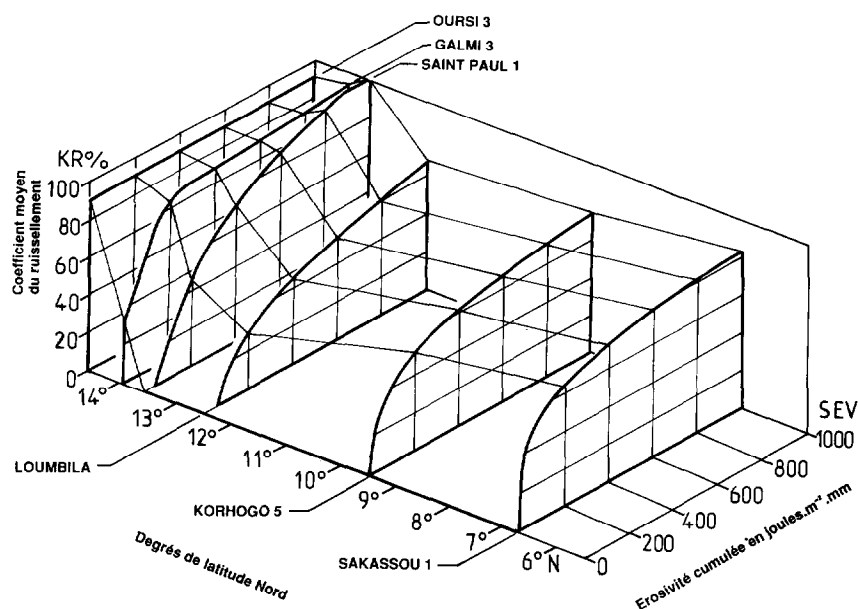


FIG. 10. — Evolution latitudinale des régimes de ruissellement avec le cumul des érosivités — *Sols sableux, labourés*, moins de 5 % d'éléments grossiers

naires lors du labour dans les régions méridionales entraîne une nette homogénéisation des comportements. Les plans KRu(SEV) montrent, par rapport aux parcelles non labourées :

— dans le nord, un gain d'infiltration généralement faible car il ne concerne que les premières averses ; sur les sols les plus lessivés (Oursi 3).

— dans le sud, une perte rapide d'infiltrabilité liée essentiellement au colmatage de surface initialement poreuse (porosité biologique).

4.2.3. SOLS SABLO-ARGILEUX À ARGILO-SABLEUX EN LEUR ÉTAT NATUREL (fig.11)

Par rapport aux sols plus sableux, la diminution, du

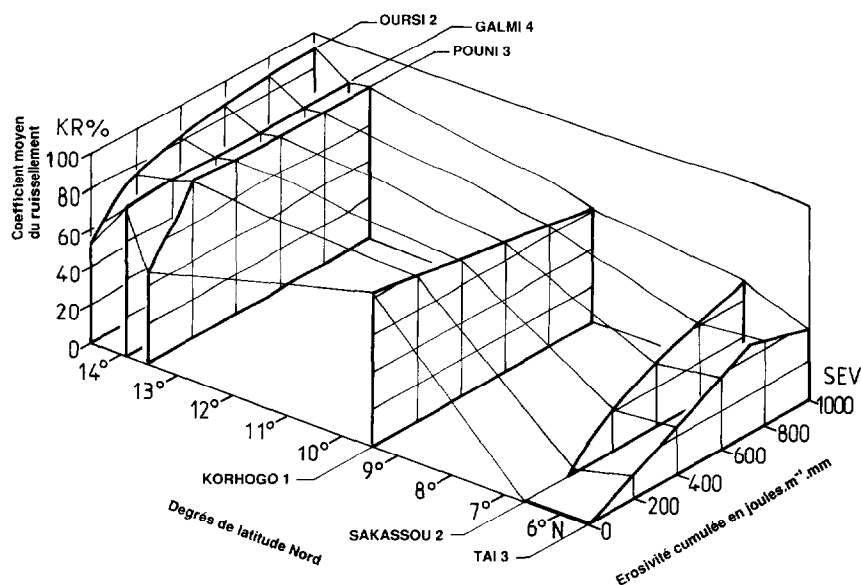


FIG. 11. — Evolution latitudinale des régimes de ruissellement avec le cumul des érosivités — *Sols sablo-argileux à argilo-sableux, naturels*, moins de 5 % d'éléments grossiers

nord au sud, des coefficients de ruissellement est plus progressive, une limite tranchée de comportement existe encore mais elle est déportée plus au sud que précédemment.

On remarquera, en comparant les blocs diagrammes des figures 9 et 11, que, dans les zones sèches, les comportements hydrodynamiques sont remarquablement indépen-

dants des classes texturales en ce qui concerne, d'une part, les valeurs identiques des coefficients de ruissellement et, d'autre part, les types de régime de ruissellement.

4.2.4. SOLS SABLO-ARGILEUX À ARGILO-SABLEUX LABOURÉS (fig.12)

L'effet résiduel du labour sur les régimes de ruissel-

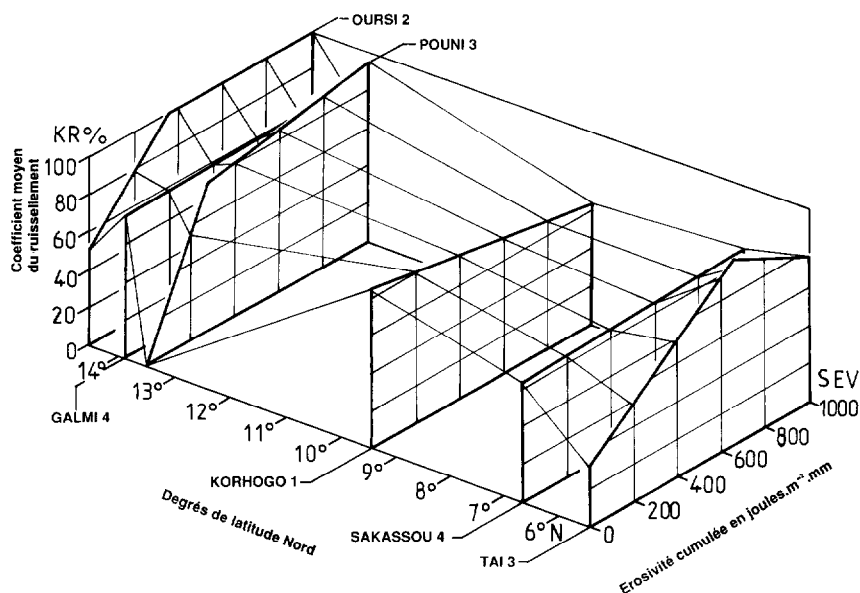


FIG. 12. — Evolution latitudinale des régimes de ruissellement avec le cumul des érosivités — Sols sablo-argileux à argilo sableux, labourés, moins de 5 % d'éléments grossiers

lement est nettement plus faible que ce que l'on avait pu observer sur les sols sableux.

Dans le domaine isohumique, le passage aux textures plus argileuses correspond presque toujours à des sols vertiques (Oursi 2, Galmi 4), smectitiques et illitiques dont les structures, chimiquement dégradables, « fondent » par simple hydratation.

Dans le domaine ferrugineux (Pouni 3), la macroporosité créée par le labour, entraîne, par rapport à l'état naturel, des gains d'infiltration intéressants jusqu'à une érosivité de 330 points correspondant aux précipitations annuelles.

Dans le domaine ferrallitique perhumide (Taï 3), les macroporosités artificielles, ouvertes par le labour, résistent plus longtemps que pour les sols du nord ce qui est une conséquence d'une meilleure stabilité des structures (cf. § 2.5.). Mais si l'on se réfère au comportement du même sol non remanié, on constate que les mottes se désagrègent plus rapidement que ne se colmatent les porosités des horizons supérieurs de ce sol non remanié (comparaison des figures 10 et 12). Si

l'on ne considère que l'amélioration, espérée, du régime d'infiltration, le labour à plat semble être une pratique néfaste, mais bien évidemment, pour cet essai, l'on ne tient compte ni de l'amélioration d'installation du futur couvert végétal, ni de son rôle protecteur.

4.2.5. RÔLE DES ÉPANDAGES D'ÉLÉMENTS GROSSIERS (fig.13)

Le même mode d'analyse a été utilisé pour mettre en évidence le rôle des recouvrements en éléments grossiers sur les régimes de ruissellement. On observe relativement peu de modifications en-deçà de 40 à 45 % de recouvrement. Au-delà, leur accumulation intervient en protégeant la surface contre l'impact direct des gouttes de pluie, donc en maintenant ouvertes les porosités situées à l'aplomb des éléments posés sur le sol. Ils interviennent aussi en créant une rugosité suffisante pour limiter la vitesse du courant de ruissellement et aussi en provoquant une turbulence susceptible de remanier ou d'empêcher la formation des colmatages intergravillonnaires. Il convient de signaler que les comparaisons

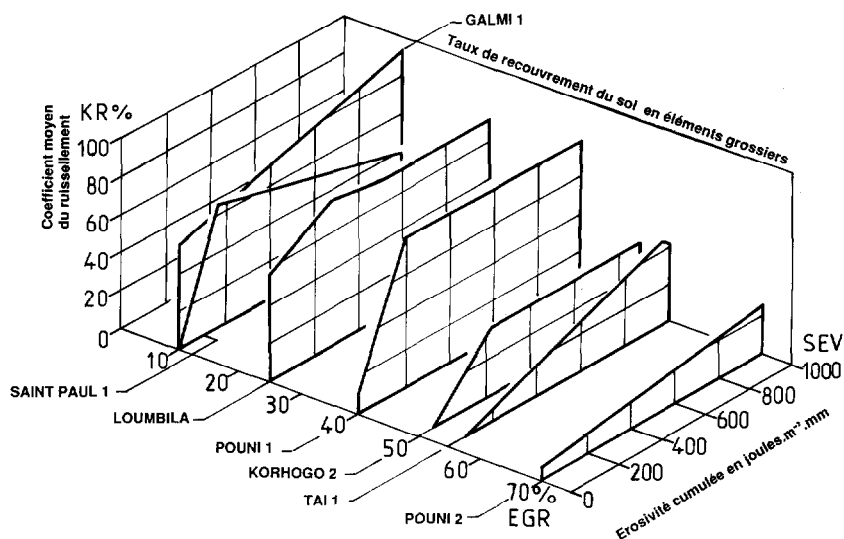


FIG. 13. — Influence des recouvrements du sol en éléments grossiers sur les régimes de ruissellement — Sols de toutes textures en leur état naturel

à textures identiques ont été impossibles à réaliser sur le transect étudié parce que les plus faibles charges correspondent aux sols sableux et les plus fortes aux sols argilo-sableux.

4.3. Conclusion : déterminisme des transferts hydriques dans les différents domaines pédoclimatiques, justification des approches

La partition des régimes de ruissellement est relativement abrupte, elle ne correspond pas à une limite entre deux domaines pédologiques mais plutôt à une limite bioclimatique séparant des remaniements d'origine physique dans le nord et d'origine biologique dans le sud.

Dans le nord, les régimes de ruissellement dépendent de l'édification et de la stabilité d'organisations méso- et microstructurales sub-superficielles contrôlant, à un niveau élevé, la conductivité hydraulique du sol. Cette simplification de l'hydrodynamique a d'ailleurs permis d'établir une typologie des « états de surface » à laquelle l'expérimentation a permis de rattacher une estimation des infiltrabilités (CASENAVE, VALENTIN, 1988). Cette simplification des dynamiques limite évidemment la portée et l'utilisation des informations de nature pédogénétique, mais elle pose aussi le problème des relations fonctionnelles que l'on est tenté d'établir entre cette dynamique actuelle et des traits pédologiques manifestement hérités de pédogénèses plus anciennes.

Vers le sud, dans le domaine sub-soudanien et plus précisément sous le parallèle 10°N, la reprise et la pérennité des activités biologiques végétales et animales destablisent, remanient, détruisent, durant de longs

mois, les organisations superficielles précédentes. Il en résulte une restauration de contrôle profond de l'infiltrabilité, la réapparition d'interrelations hydrodynamique-pédogénèse et pédogénèse-morphogénèse ; les hydrodynamiques superficielles et profondes répercutent alors, de façon plus ou moins différées dans l'espace et dans le temps, les différenciations séquentielles des sols et parfois même celles des lithomarges (POSS, 1981 — POSS, VALENTIN, 1983 — VALENTIN *et al.* 1987).

L'orientation des programmes de recherches ayant trait à la dynamique actuelle des sols doit tenir compte de cette simplification ou de cette complexité des dynamiques, ne serait-ce que pour pouvoir apprécier correctement le rapport entre l'investissement terrain et la qualité des résultats obtenus.

En zone sèche, l'accent mis depuis quelques temps sur une identification et une caractérisation conjointes des « états de surface » est moins réducteur que ce que l'on pourrait supposer. L'étude des surfaces est nécessaire pour aboutir à une prévision raisonnable des écoulements dans le réseau et l'on a constaté que les informations de terrain pouvaient être confrontées puis couplées avec celles des données satellitaires souvent de bonne qualité dans ces régions (CHEVALLIER, 1982 — CHEVALLIER, VALENTIN, 1984 — CHEVALLIER *et al.* 1985). Mais cette information est-elle suffisante ? Il semble bien que le calage des modèles de prévision des écoulements utilisant, entre autres paramètres, l'infiltrabilité de ces surfaces présente encore quelques difficultés liées à un ensemble de causes, assez mal perçues, et que l'on

attribue à un « effet échelle ». Le droit à l'extrapolation de données stationnelles est difficile à évaluer et la dégradation des informations est probablement due à un faisceau de causes parmi lesquelles on peut citer deux exemples :

— hétérogénéité des précipitations, difficile à évaluer sur un bassin versant et modifiant l'ordre d'apparition des ruissellements dans l'espace et dans le temps,

— anomalies de comportement dans la mosaïque des surfaces peu perméables où il existe des zones à drainage préférentiel, exiguës, mais dont les très fortes infiltrabilités faussent les écoulements calculés à partir des données fournies par les surfaces facilement identifiables.

En zone humide et semi-humide, l'extrapolation des

résultats expérimentaux obtenus sur parcelles ou micro-bassins reste, encore actuellement, une « opération à risque » car cette extrapolation porte plus sur des volumes que sur des surfaces. Des études récentes (ECE-REX en Guyane, HYPERBAV en Côte d'Ivoire) ont cependant démontré que de nombreuses informations pouvaient être obtenues, moyennant, il est vrai, un investissement terrain plus important que précédemment. Elles aboutissent à la compréhension des relations pédogenèse-morphogenèse, déterminent le sens et l'intensité des transformations s'opérant dans les systèmes pédologiques, et par suite, l'orientation et la quantification des flux de liquides, solubles et solides.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 10 mai 1989

BIBLIOGRAPHIE

- BARRY (J.P.), BOUDET (G.), BOURGEOT (A.), CELLES (J.C.), COULIBALY (A.M.), LEPRUN (J.C.), MANIERE (R.), 1983. — Etude des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. Groupe de Recherches Interdisciplinaires en Zones Arides (ACC. GRIZA. LAT), 114 p.
- BEAUDOU (A.G.), SAYOL (R.), 1980. — Etude pédologique de la région de Boundiali — Korhogo — Méthodologie et typologie détaillée. *Coll. Trav. et Doc. ORSTOM* n° 112, 281 p.
- BOCQUIER (G.), GAVAUD (M.), BOULET (R.), 1984. — Etude pédologique du Niger Central. Rapport général ORSTOM, Dakar, 211 p., *multigr.*, + annexes, 21 pl., 17 tabl.
- de BOISSEZON (P.), LATHAM (M.), PERRAUD (A.), RIEFFEL (J.M.), RICHE (G.), 1967. — Etude pédologique de douze zones vulnérables. Convention d'étude pour le reboisement et la protection des sols. MINAGRI de Côte d'Ivoire / ORSTOM Abidjan. 12 cartes pédologiques à 1/50 000 et notice.
- de BOISSEZON (P.), 1973. — Les matières organiques des sols ferrallitiques, in « Les sols ferrallitiques », tome IV. *Coll. Trav. et doc. ORSTOM*, n° 21 : 7-66, 15 fig.
- BOULET (R.), 1968. — Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-nord. ORSTOM Dakar, *multigr.*, 351 p., 43 tabl., 34 fig., 1 carte h.t. à 1/500.000 + annexes.
- BOULET (R.), LEPRUN (J.C.), 1969. — Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. Rapp. ORSTOM, Dakar, 331 p., *multigr.*
- BOULET (R.), 1976. — Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Thèse d'Etat. Univ. de Strasbourg. *Coll. Mém. ORSTOM* n° 85, 272 p., 20 tabl., 73 fig., 17 pl., 244 réf.
- BOULET (R.), 1978. — Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. Ministère de la Coopération/ORSTOM, Paris, 97 p., 36 réf.
- BOYER (J.), 1982. — Les sols ferrallitiques, tome X — Facteur de fertilité et utilisation des sols. *Coll. Init. et doc. tech. ORSTOM*, n° 52, 384 p.
- BRUNET-MORET (Y.), 1963. — Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : République de Haute-Volta. ORSTOM/CIEH, Paris, 23 p., *multigr.*
- BRUNET-MORET (Y.), 1963. — Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : République du Niger. ORSTOM/CIEH, Paris, *multigr.*
- BRUNET-MORET (Y.), 1966. — Complément à l'étude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : République du Tchad. ORSTOM/CIEH, Paris, *multigr.*
- BRYAN (R.B.), 1987. — Rill erosion. Processes and significance. *Catena* supplément n° 8. Edited by Bryan R.B., 192 p.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.), 1982. — Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* vol. XIX, n° 4 : 229-252.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. ORSTOM Paris — CEE, 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, Paris. *Coll. Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 62, 532 p.
- CHEVALLIER (P.), 1982. — Simulation de pluies sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi — Haute-Volta). *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4 : 253-297.

- CHEVALLIER (P.), VALENTIN (C.), 1984. — Influence des microorganismes pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un type de sol sahélien. *Bulletin du GFHN*, 17 : 9-22, 5 tabl., 4 fig., 12 réf.
- CHEVALLIER (P.), *et al.*, 1985. — Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981. Paris, *Coll. Trav. et doc. ORSTOM* n° 190 — 251 p., 5 planches photos, 58 réf., 2 cartes hors texte à 1/50000.
- COLLINET (J.), 1974. — Compte-rendu d'une tournée dans le nord de la Côte d'Ivoire. Etude de quelques relations pédogénèse — morphogénèse dans la région de Boudiali — ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé, 57 p. *multigr.*
- COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.), 1979. — Mesures de ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM Abidjan, 129 p. *multigr.* 123 fig. hors texte.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. — Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle — nouvelles perspectives — Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM sér. Pédol. XVII*, n° 4 : 283-328.
- 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 Doctorat mai 1988, ULP Strasbourg, à paraître 1989 dans *coll. Trav. et doc. ORSTOM*, 599 p., 175 fig., 252 réf.
- ECEREX, 1983. — Le projet ECEREX de Guyane. Analyse de l'écosystème forestier tropical humide et des modifications apportées par l'homme. GERDAT — INRA — ORSTOM — Muséum National d'Histoire Naturelle (France), pour « Journées de Cayenne de mars 1983 », 417 p.
- ESCHENBRENNER (V.), BADARELLO (L.), 1978. — Etude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire) — Carte des paysages morpho-pédologiques. Feuille d'Odienné à 1/200.000. *Notice explicative ORSTOM* n° 74, 123 p.
- FAO, 1980. — Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols. Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome. FAO-PNUE-UNESCO. Notice 85 p. + 1 carte Afrique à 1/5000000.
- FEODOROFF (A.), 1969. — Expérience de redistribution gravitaire. *Bull. BRGM* (2^e série), sect. III, n° 4 : 107-109.
- FEODOROFF (A.), 1970. — Une méthode pour l'étude de l'infiltration au champ. Premiers résultats. Communication au Symposium International sur l'Erosion, Prague, juin 1970. *Science du Sol*, Versailles n° 1 : 19-30.
- FOURNIER (F.), 1962. — Carte du danger d'érosion, en Afrique au sud du Sahara, fondée sur l'agressivité climatique et la topographie. Notice explicative CEE-CCTA, Paris, 11 p.
- FOURNIER (F.), 1967. — La recherche en érosion et en conservation des sols sur le Continent africain. *Sols africains*, 12, 1 : 5-53.
- GAVAUD (M.), 1977. — Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional, Paris, *Collection Trav. et doc. ORSTOM*, n° 76, 102 p., 4 fig., 37 réf.
- HENIN (S.) *et al.*, 1960. — Le profil cultural, principe de physique des sols. SEIA Paris, 320 p.
- HILLEL (D.), 1974. — L'eau et le sol — Principes et processus physiques. *Coll. Vander*, 288 p.
- HILLEL (D.), GARDNER (W.R.), 1969. — Steady infiltration into crust topped profiles. *Soil Sc.* n° 108 : 137-142.
- HORTON (R.E.), 1940. — An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 5 : 399-417.
- HYPERBAV (synthèses en cours) — Programme multidisciplinaire HYdroPédologique de Recherche sur BAssin Versant (HYPERBAV), traitant des cycles naturels des eaux et matières ainsi que des effets évolutifs de ces transferts sur des interfaces sol-plante-atmosphère (nord-ouest Côte d'Ivoire, bassin versant de Booro Borotou en savane humide).
- KALOGA (B.), 1968. — Etude pédologique de la Haute-Volta, région centre-sud, ORSTOM, Centre de Dakar Hann, 247 p., *multigr.*
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 3 : 195-237.
- LAFFORGUE (A.), 1977. — Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIV, n° 4 : 299-344.
- LEPRUN (J.C.), MOREAU (R.), 1968. — Etude pédologique de la Haute-Volta, région ouest-nord, rapp. ORSTOM, Centre de Dakar Hann, 341 p.
- LEPRUN (J.C.), 1978. — Compte-rendu de fin d'Etudes sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de « brousse tigrée » dans le Gourma. ORSTOM/DGRST, Paris, *multigr.*, 45 p., 8 tabl., 13 fig., 6 photo, 34 réf.
- LÉVÊQUE (A.), 1982. — Etudes pédologiques et agronomiques des ressources en sols de la région du nord du 10^e parallèle en Côte d'Ivoire. Feuilles à 1/200 000 de Niellé, Tingrela, Tienko. ORSTOM, *Notice Explicative* n° 96, 126 p.
- MORGAN (R.P.C.), 1980. — Soil erosion. Edit. Longman (London, New York) 113 p.
- PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire. Relations sol — végétation — climat. Thèse de Doctorat, Univ. de Nancy I, Paris, 82 p., *multigr.*

- de PLOEY (J.), 1978. — A consistency index for the prediction of surface crusting on belgian loamy soils. In « Actes du Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen » Vogt H. et Vogt T. (édit.) : 135-138.
- de PLOEY (J.), 1980. — Crusting and time dependant rain-wash mechanisms on loamy soils. In « Soil Conservation — Problems and Prospects. New York, Brisbane, Toronto : 140-152, 6 fig., 25 réf.
- POSS (R.), 1981. — Etude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire), carte des paysages et des unités morphopédologiques — 1 feuille à 1/200.000, *notice explicative ORSTOM*, Paris, n° 94, 142 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.), 1977. — Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest — Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Coll. Trav. et doc. ORSTOM* n° 78, Paris, 108 p.
- ROOSE (E.), 1981. — Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale — Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles et cultivées. Thèse de Doctorat és-Sciences, octobre 1980. Université d'Orléans. *Coll. Trav. et doc.* n° 130 ORSTOM, 569 P.
- VALENTIN (C.), 1979. — Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. in « Actes du Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen ». Vogt H. et Vogt T. (édit.) : 117-122, 2 tabl., 3 fig., 26 réf.
- VALENTIN (C.), 1981. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions sub-désertiques (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3^e cycle. Université Paris VII. Edit. 1985, *coll. Etudes et Thèses*, ORSTOM, 260 p.
- VALENTIN (C.), FRITSCH (E.), PLANCHON (O.), 1987. — Sols, surfaces et formes d'érosion linéaires en milieu ferrallitique de Savane. L'exemple d'un bassin versant du nord-ouest de la Côte d'Ivoire — in « Land Development Managment of acid soils » IBSRAM, Proc. n° 4. Bangkok : 67-81, 5 fig., 21 réf.