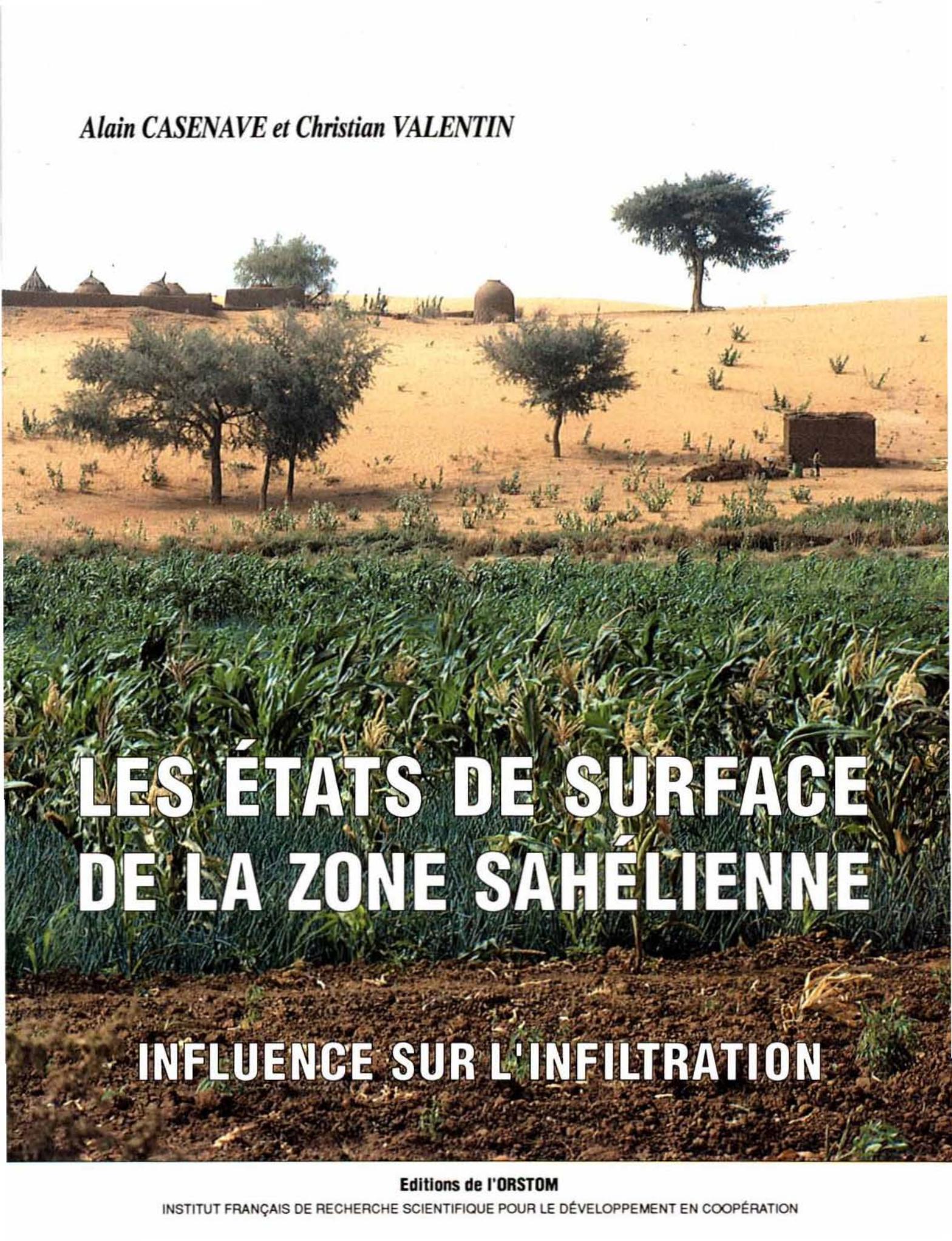


Alain CASENAVE et Christian VALENTIN



**LES ÉTATS DE SURFACE
DE LA ZONE SAHÉLIENNE**

INFLUENCE SUR L'INFILTRATION

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

**LES ÉTATS DE SURFACE
DE LA ZONE SAHÉLIENNE**

INFLUENCE
SUR L'INFILTRATION

Alain CASENAVE et Christian VALENTIN

LES ÉTATS DE SURFACE DE LA ZONE SAHÉLIENNE

INFLUENCE SUR L'INFILTRATION

Publié avec le concours
du Ministère de la Recherche et de la Technologie

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection ▷▷ACTIQUES

PARIS 1989

Auteurs des photographies

Jean ALBERGEL	photos n° 1, n° 11, n° 15, n° 30, n° 56, n° 85, n° 89, n° 106, n°115, n° 116, n° 118, n° 119, n° 129, n° 186
Alain CASENAVE	photos n° 64
Jean-Marc IRIS	photos n° 97
Jean-Louis JANEAU	photos n° 32, n° 70, n° 132, n° 143, n° 146, n° 147
Jean-Yves LOYER	photos n° 101, n° 102
Bernard THEBE	photos n° 108, n° 123, n° 136
Christian VALENTIN	les autres photos

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

SOMMAIRE

	pages		pages
RÉSUMÉ	7	LES PROCESSUS ET LES FACTEURS	
ABSTRACT	7	DE RÉORGANISATION SUPERFICIELLE	63
PRÉFACE (J.RODIER)	9	Les processus de formation des croûtes de surface..	65
AVANT-PROPOS	11	Les facteurs de réorganisation superficielle	74
INTRODUCTION	13	LES SURFACES ÉLÉMENTAIRES	91
SIMULATION DE PLUIE		Présentation générale de l'approche	93
ET HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE	21	Description de la surface élémentaire	94
Principes et caractéristiques du simulateur de pluie	23	Les principales surfaces élémentaires	125
Protocoles des pluies simulées	26	Exemple d'utilisation de la typologie :	
Les variables hydrodynamiques mesurées		calage d'un modèle agroclimatologique	142
sous pluies simulées	29	LES VARIATIONS DANS L'ESPACE	
Validité des mesures sous pluies simulées	32	ET DANS LE TEMPS	145
REPRÉSENTATIVITÉ DES SITES ÉTUDIÉS	33	La méthode cartographique	147
Schéma général des régimes pluviométriques		L'extension spatiale : intérêts et limites	
en Afrique subtropicale et intertropicale	35	de la télédétection	155
Les grands traits de la géologie sahélienne	42	Quelques états de surface caractéristiques	158
Les principaux types de sols	46	La dynamique évolutive des états de surface	170
Le couvert herbacé	56	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	188
La mésofaune	58	BIBLIOGRAPHIE	190
Le travail du sol	60	INDEX	205
		GLOSSAIRE	212

RÉSUMÉ

L'importance des problèmes liés à l'utilisation de l'eau dans la zone sahélienne a entraîné, depuis une dizaine d'années, le développement des études sous pluie simulée. Elles ont permis de déterminer les facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement sur une vaste zone géographique et de hiérarchiser l'importance relative de ces différents facteurs. C'est ainsi que s'est manifesté, en zone sahélienne, le rôle prépondérant des caractéristiques de surface sur l'infiltrabilité, au premier rang desquelles se classent le couvert végétal, l'activité faunique, le microrelief et le type de croûte.

L'étude des processus et l'analyse des facteurs de réorganisation superficielle, associée à la description des microhorizons, aboutit à la définition d'une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes. De l'identification de ces grands types de croûte, et d'autres critères relatifs à l'activité faunique, à la couverture et au travail du sol, découle une typologie des principales surfaces élémentaires. A chacune, correspond un comportement hydrodynamique particulier, caractérisé par un certain nombre de paramètres de l'infiltration et du ruissellement.

A une échelle supérieure, la combinaison de ces surfaces élémentaires mène à la définition du concept d'état de surface, base d'une méthode cartographique originale. Celle-ci fait appel à un système normalisé de description du milieu. Les unités, ainsi définies, répondent à des critères d'homogénéité tant au niveau de leur dynamique évolutive qu'à celui de leur fonctionnement hydrologique. En outre, cette cartographie des états de surface s'est avérée extrapolable par télédétection. En zone sahélienne, la conjugaison des études sous pluie simulée, de la télédétection et d'une modélisation à petits pas de temps constitue un outil performant pour la simulation des écoulements, la prédétermination des crues de fréquence rare, et la transposition des résultats à un bassin non observé.

La typologie des surfaces élémentaires peut être utilisée pour le diagnostic de l'état de dégradation des milieux sahéliens. De surcroît, son caractère génétique permet de prévoir leur évolution sous les effets conjugués de la sécheresse et de la surexploitation par l'homme.

MOTS-CLÉS :

cartographie, croûte, désertification, état de surface, infiltration, ruissellement, Sahel, simulation de pluie, typologie.

ABSTRACT

Rainfall simulation experiments have been implemented in the Sahelian zone for more than ten years as related to the aggravating water management problems. They have led to the assessment and the comparison of the various factors influencing infiltration and runoff in this climatic zone. The prevailing role of the surface features clearly came out, including vegetation cover, faunal activity, surface roughness and surface crust.

The analysis of the processes and the factors involved in surface crusting, coupled with the identification of peculiar micro-layers led to the definition of a morphogenetic typology of 9 major types of Sahelian crusts. In addition, grass or crop cover, faunal activity and tillage were taken into account to characterize 11 main unit surfaces. This morphological approach coupled with the rainfall experiments enabled the authors to associate specific hydraulic parameters to each unit surface.

A a higher scale level, the concept of "surface features" was proposed. It referred to the combination of several unit surfaces and was used as the base of an original mapping method including standardized descriptions. Mapping units were considered thus as homogeneous both in terms of dynamics and hydraulic behaviour. Besides, remote sensing was satisfactorily used in mapping unsurveyed watersheds. Low-frequency floods were determined with a reasonable accuracy and results could be derived to unstudied watersheds, provided remote sensing had been combined with the rainfall experiments data and a small time-step modelization.

Diagnosing the stage of degradation of the Sahelian environment referred to the typology of unit surfaces. Furthermore, since this typology is partly genetically based, the various scenarios of evolution under the combined effects of drought and land abuse could be sketched out.

KEY-WORDS :

mapping, surface crust, desertification, surface features, infiltration, runoff, Sahel, rainfall simulation, typology.

PRÉFACE

Nombreux sont les hydrologues qui ont rêvé de déterminer les caractéristiques hydrologiques : débit moyen annuel ou débit de pointe de crue de telle ou telle fréquence d'un bassin après un simple examen, sans observation, ni mesure de débit. Certains, dépassant le stade du rêve, ont cherché avec plus ou moins de bonheur à élaborer une méthodologie efficace pour y parvenir. C'est assez rarement facile et parfois impossible, mais quel que soit le type d'approche qu'ils aient adopté, stochastique ou déterministe, ils ont toujours buté, tout au moins en ce qui concerne les problèmes de crue, d'écoulement annuel ou saisonnier, sur un obstacle particulièrement redoutable. Comment quantifier l'aptitude au ruissellement des divers types de sols et plus particulièrement de leurs couches superficielles ou, ce qui revient au même, leur aptitude à l'infiltration dans diverses conditions standard ?

Or, si dans quelques cas particuliers : argile nue compacte, certaines cendres volcaniques par exemple, on arrive facilement à avoir une bonne idée de cette aptitude : près de 100 % ou près de 0 %, cela n'est pas si simple en général.

En forêt tropicale, les hydrologues de l'ORSTOM ont été surpris par de forts ruissellements qu'un rapide examen des sols ne pouvait pas laisser prévoir. Au Sahel, d'autres surprises du même genre les attendaient.

Dès 1955, on avait pourtant essayé de caractériser les propriétés hydriques des sols par des essais MÜNTZ ou PORCHET, mais souvent, le fait de briser plus ou moins la croûte superficielle des sols donnait à certains hydrologues des remords qui se sont avérés justifiés par la suite. En outre, la dispersion des résultats et l'insuffisance de l'information sur les types de sols des bassins et leurs réactions aux précipitations ne permettaient pas d'arriver à des résultats assez sûrs. Il y avait bien les résultats des bassins représentatifs qui donnaient une vague idée de la réaction d'ensemble mais cette approche était trop globale pour fournir, en général, une solution acceptable.

Alors, faute de mieux, vers 1961, on avait vaguement classé les bassins en cinq catégories qui se ramenaient à trois : ceux qui ruissellent bien, ceux qui ruissellent assez bien, et ceux qui ruissellent mal, ce qui, dans bien des cas, entraînait des erreurs atteignant ou dépassant 100 % sur l'aptitude au ruissellement à l'intérieur d'une seule catégorie de sols.

Pour sortir de cette impasse il fallait mettre au point une méthodologie de mesures valable pour l'infiltration des sols, approfondir nos connaissances scientifiques sur les processus de l'infiltration à la surface du sol et ceci ne pouvait être réalisé sans une étroite collaboration entre pédologues et hydrologues.

Cette collaboration a pris naissance de façon non formelle en 1955, mais elle était déjà efficace. Elle s'est renforcée surtout lorsque le grand simulateur de pluie de SWANSON, introduit par les pédologues pour l'étude de l'érosion, a vu ses applications s'étendre à l'analyse du ruissellement et elle a pris une forme beaucoup plus nette lorsque l'on a utilisé le mini-simulateur. Comme on pourra le vérifier dans le présent ouvrage, ce projet de recherche est tout à fait exemplaire d'une opération pluridisciplinaire réussie.

La mise au point de ce mini-simulateur de pluie, facilement transportable, et d'un protocole de mesure bien adapté, a permis de reconstituer des averses analogues aux averses tropicales et de mesurer le ruissellement sur une parcelle sans briser la croûte superficielle. Les chercheurs pédologues et hydrologues qui ont mené ces recherches ont été agréablement surpris lorsqu'ils ont constaté que les résultats obtenus sur 1 m² étaient comparables à ceux que fournissait le grand simulateur et même qu'on pouvait, moyennant certaines conditions, extrapoler les données recueillies à un petit bassin. La solution au problème qui nous préoccupe était en vue.

Par bonheur, contrairement à ce qu'on observe parfois dans le domaine de la recherche, ces chercheurs ne se sont pas contentés d'une brillante démonstration sans lendemain. Alain CASENAVE, ses collègues et ceux qui l'ont précédé ont étudié systématiquement (depuis 1977 avec le mini-simulateur, depuis 1975 avec le simulateur de SWANSON), les sols forestiers, puis les sols de savane et, enfin, les sols sahéliens. Pendant dix ans les mesures se sont succédées, le plus souvent sur des bassins représentatifs déjà observés, pour pouvoir disposer en même temps d'éléments de comparaison à une autre échelle et d'un certain contrôle.

Par ailleurs, les recherches pédologiques déjà effectuées au Sahel ont été magistralement complétées par les travaux de Christian VALENTIN sur les organisations pelliculaires superficielles des sols, sans la connaissance desquelles il n'est pas possible de comprendre les phénomènes de ruissellement et d'infiltration dans ces régions. Mais ici, aussi il a fallu beaucoup de persévérance pour arriver à des résultats s'appliquant à l'ensemble des zones intéressées. Depuis 1968, des pédologues avaient entrepris l'analyse de ces organisations superficielles qui n'avaient pas échappé aux pédologues et hydrologues, mais dont on ne soupçonnait ni l'extension ni l'importance. Ce n'est qu'en 1979 que J. COLLINET et C. VALENTIN ont combiné leurs travaux d'analyse à des mesures expérimentales de comportement et ceci a abouti à une thèse présentée en 1981, à laquelle les hydrologues avaient apporté un modeste concours. Ses conclusions ont particulièrement

contribué à renforcer la collaboration entre C. VALENTIN et A. CASENAVE.

Ces deux chercheurs qui paraissent ainsi les plus qualifiés pour traiter des problèmes de ruissellement sur petites surfaces au Sahel, ont donc longtemps travaillé ensemble, et ils se sont associés pour présenter dans cette publication, parmi les résultats de leurs recherches, ceux qui pouvaient être les plus utiles aux techniciens ayant à traiter des problèmes de crues.

Il était tentant de présenter ces données sous la forme la plus pratique à utiliser pour caractériser les différentes parties d'un bassin versant. Or, les régions sahéliennes présentent certaines caractéristiques qui facilitent l'étude des bassins versants ou mieux, celles de leurs différentes surfaces élémentaires. Le nombre de types de sols est relativement faible, les cultures assez peu variées et peu étendues et la couverture végétale naturelle peu dense. Il n'est donc pas utopique de chercher à passer en revue la quasi-totalité des surfaces élémentaires, c'est-à-dire des ensembles : sols-culture-couverture végétale, et de mettre au point un véritable répertoire les concernant, avec, d'une part, leur description simple mais complète et, d'autre part, les données quantitatives intéressant l'infiltration avec leur mode d'emploi.

Il se présente sous la forme de deux clefs de déterminations comparables, à celles des flores : la clef des croûtes sahéliennes et la clef des principales surfaces élémentaires, suivies de fiches descriptives pour chaque type de surface élémentaire.

La clef des surfaces élémentaires intéresse presque tous les sols connus y compris ceux sur lesquels l'emploi du mini-simulateur est impossible. De sorte que l'utilisateur, après examen du terrain, et ensuite des photos aériennes ou mieux, à partir de cartes établies d'après les données de satellites, peut trouver au moins un ordre de grandeur et le plus souvent des valeurs approchées du coefficient d'infiltration, de la hauteur de la pluie d'imbibition pour plusieurs conditions d'humidité préalable des sols, pour des averses de 50 mm de pluie utile correspondant à une pluie journalière de 60 mm environ, ce qui, pour un bassin de 20 km², correspondrait à une pluie journalière décennale de 70 mm maximum-ponctuel, valeur proche de la pluie décennale de nombreux bassins sahéliens. Ces fiches fournissent également l'intensité limite de ruissellement. Pour une pluie donnée et moyennant une combinaison correcte, mais parfois délicate, des apports des diverses surfaces élémentaires, ceci assure, en principe, une évaluation correcte de la fonction de production correspondante.

Cependant, il est difficile d'arriver à caractériser un type de sol sans une compréhension suffisante de son environnement et quelques notions extrêmement simples de Pédologie, d'où la nécessité d'introduire,

dans cet ouvrage, une seconde et une troisième parties, relativement volumineuses, mais que nous recommandons instamment de lire avant toute utilisation des clefs de détermination.

La lecture directe de ces clefs et des fiches des surfaces élémentaires, sans consulter ces deux parties, risquerait de conduire à de fortes erreurs dans les applications. De même qu'autrefois, les hydrologues devaient assimiler quelques notions de calcul de probabilité, avant de se lancer dans le calcul des débits de crue, il est normal que maintenant, ils prennent connaissance d'un très faible minimum de Pédologie, avant de classer des types de sols et des caractéristiques physiogéographiques du Sahel, s'ils ne les connaissent pas déjà.

La perfection n'est pas de ce monde et les auteurs, à juste titre, n'ont pas attendu qu'absolument tous les types d'états de surface soient étudiés, sur l'ensemble du Sahel, pour rédiger cet ouvrage.

Le répertoire pourra probablement être complété dans quelques années. Dans le même ordre d'idée, l'utilisateur ne peut pas s'attendre à parvenir à déterminer un coefficient d'infiltrabilité d'un bassin versant à 5 % près, quels que soient les types d'états de surface. On trouvera un graphique qui, à l'échelle de la parcelle, donne une idée de la précision des résultats. Cependant, cette précision sera suffisante dans presque tous les cas rencontrés dans la pratique.

C'est un énorme progrès par rapport aux pratiques de calculs antérieures à la publication de cet ouvrage qui consistaient à classer, à vue d'oeil, un bassin en catégorie imperméable, relativement imperméable ou perméable, avec des coefficients de ruissellement qui peuvent parfois varier de plus de 100 % à l'intérieur d'une seule catégorie.

Ce qui est remarquable dans cet ouvrage, c'est le soin pris par ses auteurs pour qu'il puisse être utilisé même par des techniciens peu familiarisés avec la Science des Sols. La plupart des expressions à caractère hautement spécialisé ont été éliminées du texte sauf quelques termes dont on ne pouvait pas se passer et qui sont expliqués dans un glossaire. Si l'utilisateur doit remplir des fiches de description de surfaces, on lui donne des indications très simples pour le faire et on évite sur le terrain toute opération délicate ou qui exigerait un matériel spécialisé.

Ce répertoire peut être consulté par tous.

Il convient de féliciter les auteurs pour la mise au point d'un ouvrage si utile et si bien adapté et de souhaiter qu'il ait la plus large diffusion.

A Brétignolles, le 29 décembre 1987,

J. RODIER

Ancien chef du service Hydrologique de l'ORSTOM

AVANT-PROPOS

A partir d'une méthodologie mise au point en Côte d'Ivoire, des programmes d'étude de l'infiltration et du ruissellement sous pluies simulées ont été entrepris progressivement à partir de 1981 dans plusieurs pays d'Afrique francophone : Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Cameroun et Congo. L'ensemble de ces travaux était coordonné par les auteurs. Les résultats exposés dans cet ouvrage, qui ne représentent qu'une partie de ceux obtenus par ces équipes, sont donc l'expression d'une oeuvre collective à laquelle ont participé :

MM. ALBERGEL, BADER, BERNARD,
BRICQUET, CASENAVE, CHEVALLIER,
DELFIEU G., DELFIEU J.M., GATHELIER,
GIODA, KONG, MAILHAC, RIBSTEIN,
THEBE, THIEBAUX (hydrologues de l'ORSTOM)
et MM. ASSELINE, COLLINET, FRITSCH, IRIS,
JANEAU, PONTANIER, POSS, VALENTIN
(pédologues de l'ORSTOM).

Ce programme d'étude de l'infiltration et du ruissellement sous pluies simulées s'insère, pour sa partie sahéenne, dans un des grands programmes de l'ORSTOM dont l'objectif est de déterminer les processus de formation des crues au Sahel. Les résultats obtenus sur petites parcelles doivent permettre une meilleure compréhension du comportement des différents sols ou de leurs états de surface, à un épisode pluvieux et servir ainsi à la définition de *zones contributives homogènes**.

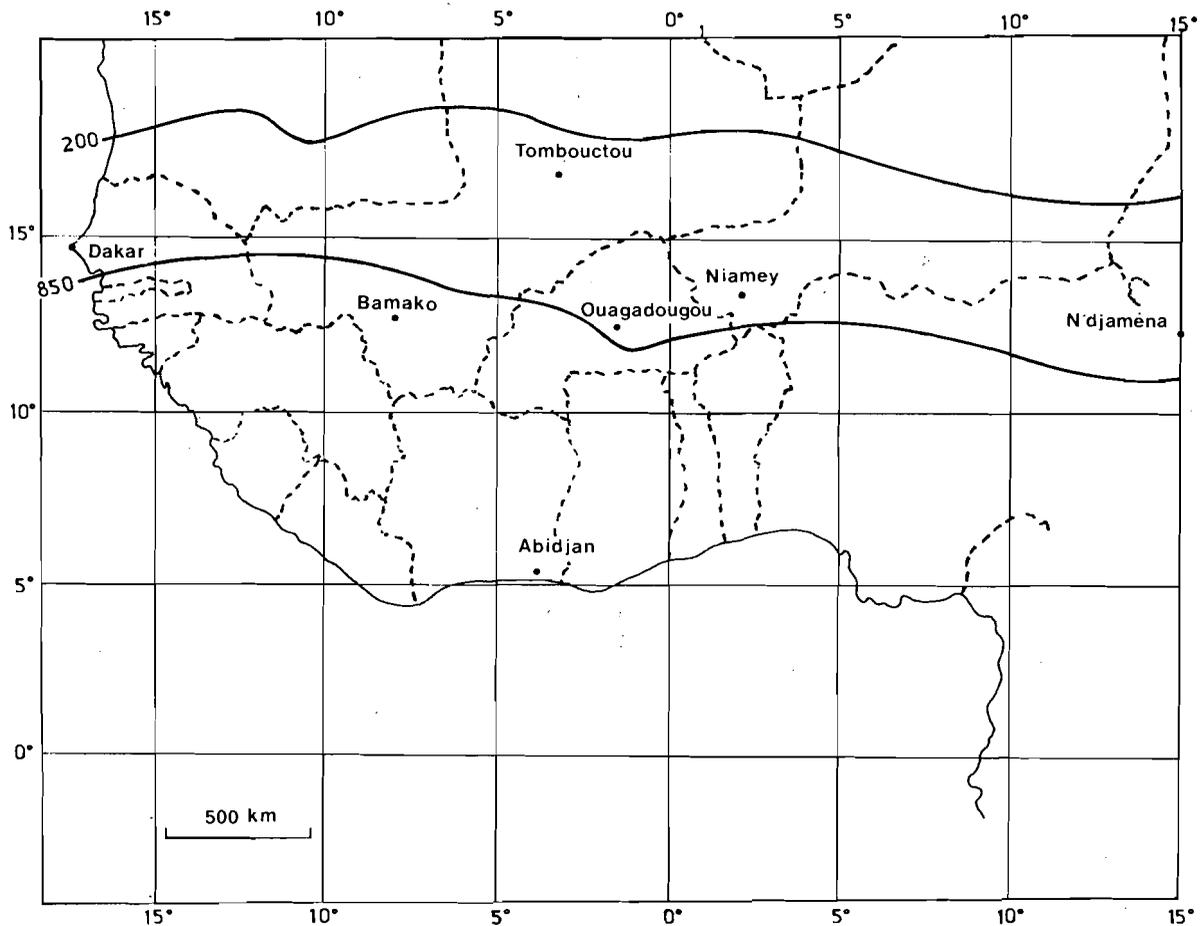
Les auteurs remercient vivement MM. RODIER, BRABANT et COLLINET pour la relecture du manuscrit, leurs encouragements et leurs critiques constructives.

* c.f. glossaire en fin d'ouvrage

INTRODUCTION

La zone sahélienne est prise, dans cet ouvrage, dans son acception hydrologique, c'est-à-dire comprise entre les isohyètes* interannuelles 200 et 750-850 mm (carte 1). La limite sud de cette zone, plus qu'à un total pluviométrique, correspond à la disparition du phénomène de dégradation du réseau hydrographique*. Nous verrons ultérieurement que ces limites se superposent également à une modification des facteurs conditionnels de l'infiltration. Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas pu travailler au Tchad ou dans les pays de l'est africain. La limite orientale de notre étude correspond à peu près à la longitude du lac Tchad.

aménagement important pour l'irrigation, qu'une récolte par an. La forte irrégularité interannuelle augmente la probabilité d'apparition de saisons des pluies déficitaires et donc de récoltes mauvaises, voire nulles, pour certaines années très sèches. Du fait des très fortes intensités que peuvent atteindre les "tornades" dans ces régions (des intensités de 150 à 200 mm.h⁻¹ en 5 mn et de 60 à 70 mm h⁻¹ pendant 30 mn ne sont pas exceptionnelles), la fraction de la pluie qui ruisselle y est généralement beaucoup plus importante que sous les climats tropicaux humides, ou tempérés. De plus, les sols pauvres en matière organique et mal protégés par



Carte n° 1. Isohyètes interannuelles 200 et 750-850 mm

Dans ces régions, l'absence d'eau ou son insuffisance constitue un des principaux facteurs limitants du développement. Moins que la faible pluviosité - il pleut davantage à Ouagadougou qu'à Paris - le principal problème pour toute l'Afrique sahélienne résulte de l'irrégularité annuelle et interannuelle de la pluviométrie. La brièveté de la saison des pluies ne permet, sauf

une végétation peu développée, ont tendance, sous l'effet de ces fortes intensités, à subir des réorganisations superficielles importantes qui limitent encore l'infiltration. C'est pour ces raisons qu'il est nécessaire de bien distinguer dans cette zone les données climatiques (hauteurs pluviométriques) des données pédoclimatiques (quantité d'eau qui s'infiltré et participe à la

recharge du stock hydrique des sols), aussi bien dans l'étude des problèmes agronomiques, que pédologiques (évolution actuelle des sols) ou hydrologiques (étude des crues). En règle générale, cette dualité climat-pédo-climat a tendance à s'accroître lorsque la pluviométrie annuelle diminue. On comprendra, dès lors, l'intérêt d'étudier l'hydrodynamique des sols, objet de plus en plus fréquent des recherches des pédologues et hydrologues de l'ORSTOM.

HISTORIQUE DES MESURES SOUS PLUIES SIMULÉES

Les travaux menés actuellement sous pluies simulées sont l'aboutissement d'une évolution progressive des techniques d'étude de l'hydrodynamique des sols. Depuis fort longtemps, les hydrologues se heurtaient lors de l'interprétation de leurs mesures, particulièrement celles des bassins versants représentatifs et expérimentaux (photo n° 1), à l'impossibilité de quantifier l'aptitude au ruissellement des différents types de sols. Les renseignements tirés des cartes pédologiques s'avéraient peu pertinents, la classification pédologique, fondée sur des critères morphogénétiques, ne reflétant pas les caractéristiques hydrodynamiques des sols. Pour tester de façon plus précise ces caractéristiques, dans un premier temps, les hydrologues ont utilisé largement l'*infiltromètre à double anneau* (MÜNTZ) mais, comme nous le verrons plus loin, les trop faibles surfaces concernées par l'essai, le manque de standardisation de la technologie et surtout la destruction au moins partielle de la croûte superficielle lors de l'installation de l'appareil, ne permettaient d'obtenir, dans les meilleures conditions, que des résultats de caractère qualitatif. A peu près en même temps, de nombreuses parcelles de ruissellement, d'érosion, de drainage oblique ou vertical ont été installées par les pédologues et les hydrologues de l'ORSTOM et du CIRAD, sous diverses latitudes (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Bénin, Tchad, Tunisie, Guyane, Madagascar, etc.).

Il est ensuite apparu, qu'un progrès pouvait être réalisé en s'affranchissant des aléas des précipitations naturelles par la technique de simulation des pluies. Un premier appareil, dérivé du *simulateur de type SWANSON* (photo n° 2), a été utilisé, de 1975 à 1980, par une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM, sur des sites échelonnés de la zone tropicale humide à la zone sahéenne (Côte d'Ivoire, Burkina Faso et Niger). Outre des résultats importants sur la modélisation de l'infiltration (LAFFORGUE, 1977) et les processus érosifs (COLLINET, 1984), le principal apport de cette équipe a été de mettre en évidence l'influence primor-

diale des états de surface sur l'hydrodynamique en zone sahéenne (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; COLLINET et VALENTIN, 1979). En 1977, dans le cadre d'une étude des crues décennales des petits bassins versants de la zone forestière tropicale, est utilisé un *mini-simulateur de pluie* (photo n° 3), mis au point par l'ORSTOM (ASSELINE et VALENTIN, 1978) pour tester les caractéristiques hydrodynamiques des différents sols forestiers. La comparaison des résultats obtenus avec ceux du simulateur de SWANSON, opérant sur deux parcelles de 50 m² (COLLINET, 1986) et avec les données des bassins représentatifs correspondant aux mêmes types de sols (CASENAVE, GUIGUEN, SIMON, 1982) a montré que malgré la faible surface étudiée, 1 m², l'appareil était fiable sous réserve d'une utilisation appropriée. En 1980-81, une première utilisation du simulateur, en zone sahéenne, à des fins hydrologiques, est tentée dans le cadre de l'étude de la Mare d'Oursi au Burkina Faso (CHEVALIER, 1982). Parallèlement, les pédologues poursuivaient leurs travaux sur l'étude de la genèse et du comportement hydrodynamique des organisations pelliculaires superficielles (VALENTIN, 1981).

Au vu des résultats de ces différentes études, le Comité Technique d'Hydrologie de l'ORSTOM, décidait d'étendre cette nouvelle technique à d'autres pays. Des programmes de recherches sont ainsi progressivement développés au Cameroun (1982), au Congo, au Togo (1983) et enfin au Niger (1984). Seule une partie des résultats obtenus depuis 10 ans, par l'utilisation de ce simulateur est exposée dans cet ouvrage.

INTÉRÊT DES ÉTUDES SOUS PLUIES SIMULÉES

Les nombreuses études réalisées jusqu'à présent dans le domaine des relations eau-sol (bassins versants, parcelles d'érosion ou de ruissellement, bilans hydriques des sols etc.) se heurtaient à :

- un problème *d'analyse des paramètres* qui exercent une influence sur l'infiltration et le ruissellement. Du fait de leur nombre et de leurs interactions, il est difficile, sous pluies naturelles, de mettre en évidence leur rôle respectif. Le simulateur de pluie, qui permet de fixer à volonté, les caractéristiques des averses, l'état d'humectation du sol par des arrosages successifs, de tester différents types de sols, d'états de surface, de couvertures végétales ou de pentes, autorise une analyse beaucoup plus fine des phénomènes,
- un problème de *durée des études*. Pour obtenir un résultat fiable sous pluies naturelles, il est nécessaire de prolonger les mesures sur plusieurs années, surtout en zone sahéenne où les pluies sont rares et irréguli-



photo 1.
Station hydrométrique
du bassin versant de Binndé, Burkina Faso.



photo 2.
Simulateur ORSTOM de type SWANSON.
Galmi, Niger.

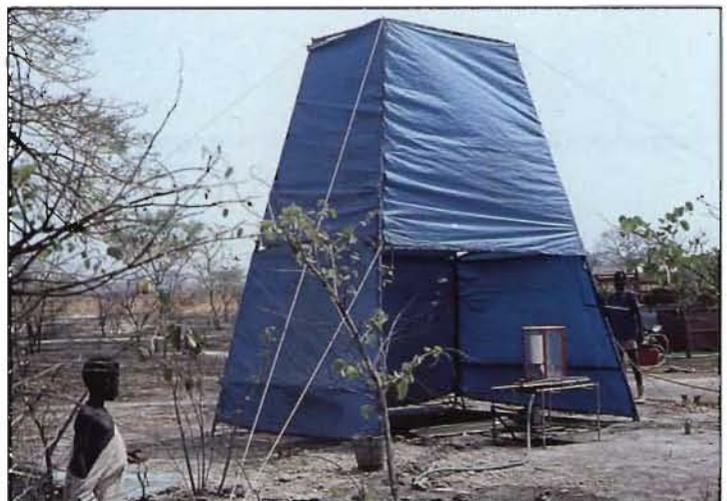


photo 3.
Minisimulateur de pluie ORSTOM,
N'Dorola, Burkina Faso.

lières. Grâce aux mesures sous pluies simulées, la durée des études a pu être réduite de façon très sensible pour un résultat d'une précision sensiblement égale, sinon supérieure dans certains domaines, à celle des mesures classiques,

- un problème *d'extension spatiale des résultats*. Du fait de leur durée, les mesures classiques ne sont effectuées que sur un petit nombre de sites. Les mesures sous pluies simulées, beaucoup plus rapides, permettent pour un même investissement de tester un nombre de sites bien plus élevé. De plus, les mesures sous pluies simulées ont révélé, qu'en zone soudano-sahélienne, seule la cartographie très détaillée des états de surface permet une extrapolation fiable des résultats acquis sur parcelles au niveau du petit bassin versant,
- un problème *d'expérimentation*. Les mesures d'infiltration ont, dans la plupart des cas, été réalisées à

l'aide de techniques interdisant le ruissellement (MÜNTZ - photo n° 4, PIOGER etc.) qui détruisent ou modifient les croûtes superficielles et sont donc très éloignées de la réalité physique des phénomènes. Les études sous pluies simulées ont montré que, dans le cas général, les valeurs d'intensité d'infiltration ne peuvent être déduites de tests infiltrométriques de type MÜNTZ (LAFFORGUE et NAAH, 1976 ; VALENTIN, 1981) ; en effet, non seulement les valeurs ne sont pas du même ordre de grandeur, mais elles ne correspondent même pas à un classement identique, les réactions de la surface du sol à l'impact des gouttes de pluie n'étant pas les mêmes que pour l'apport d'une épaisse lame d'eau (Tableaux 1 et 2).

Tableau 1

Comparaison des valeurs de F_n (cf. définition chapitre 3, §1.3) mesurées sous pluies simulées et par la méthode MÜNTZ à Abidjan (LAFFORGUE et NAAH, 1976).

Parcelle	Intensité maximale d'infiltration (mm.h^{-1})				
	Pluie simulée Intensités (mm.h^{-1})			Méthode MÜNTZ : moyenne de 3 essais	
	60	90	120	Sol sec	Sol humide
5	14,7	18,0	21,3	900	743
6	33,4	44,9	56,3	590	288
7	56,6	80,9	105,0	483	308
8	60,0	90,0	120,0	580	422

Tableau 2

Comparaison des intensités limites de ruissellement (pluie simulée) et des conductivités hydrauliques à saturation (K_{sat} , méthode PIOGER), à Agadez (VALENTIN, 1981).

Parcelle	Intensité limite de ruissellement (mm.h^{-1})	K_{sat} (PIOGER) (mm.h^{-1})
1	1,9	56
2	17,9	887
3	8,9	52
4	6,9	1480
5	19,6	128
6	11,3	95

Photo 4.
 Mesure de l'infiltrabilité sous double anneau
 (dispositif MUNTZ géant),
 plaine alluviale du fleuve Sénégal, Sénégal.



Photo 5.
 Partie sommitale du sol en zone de forêt tropicale,
 bassin versant du Nion, Côte d'Ivoire.



Photo 6.
 Partie sommitale du sol en zone de savane humide,
 bassin versant de Booro-Borotou, Côte d'Ivoire.

LES ÉTATS DE SURFACE

Définitions

Surface élémentaire

Le terme "*surface élémentaire*" désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivants :

- le couvert végétal,
- la surface du sol,
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.

Etat de surface

Le terme "*état de surface*" peut désigner :

- une seule surface élémentaire,
- la juxtaposition de plusieurs,
- ou un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble, au sein duquel jouent des interactions.

Influence des états de surface

De nombreux travaux, à la suite de ceux de DULEY (1939), ont mis en évidence le rôle joué par les caractéristiques physiques des premiers centimètres du sol. Toutefois, la plupart de ces données ont été obtenues, au laboratoire, sur des échantillons remaniés. Par ailleurs, elles étaient restées très fragmentaires jusqu'à ces dernières années. Plusieurs auteurs (AUDRY et ROSSETTI, 1962 ; GAVAUD, 1968 ; BOCQUIER, 1971 ; LEPRUN, 1978 et 1979 ; BOUGERE, 1979 ; ESCADAFAL, 1981) ont entrepris l'analyse des organisations superficielles en zone sahélienne et subdésertique, mais ces analyses n'étaient pas combinées à des mesures expérimentales de comportement. Il a fallu attendre la fin des années 70, et les premiers résultats des mesures sous pluies simulées pour mettre en évidence l'influence déterminante des organisations superficielles sur le comportement des sols vis à vis de l'eau (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; COLLINET et VALENTIN, 1979 ; VALENTIN, 1981). L'importance de la strate herbacée sur les phénomènes de ruissellement et d'infiltration a également été révélée par les mesures sous pluies simulées (ALBERGEL et al., 1986).

HIÉRARCHISATION DES FACTEURS CONDITIONNELS DE L'INFILTRATION

Les résultats acquis au cours de ces dix dernières années sous pluies simulées, le long d'un transect climatique allant de la forêt tropicale humide au Sahara, ont permis de hiérarchiser les facteurs intervenant, dans le milieu naturel, sur l'hydrodynamique superficielle (VALENTIN, 1986).

En zone de forêt tropicale

(pluviométrie annuelle > 1600 mm)

Les différents travaux (CASENAVE et al., 1982 ; COLLINET, 1984) montrent l'influence prépondérante des organisations internes de la couverture pédologique sur l'infiltration. La relative uniformité du couvert végétal et le faible développement des réorganisations pelliculaires en surface favorisent la pleine expression des propriétés hydrodynamiques internes sur l'infiltration. Celle-ci est généralement favorisée par l'existence d'une macroporosité, souvent d'origine biologique, ouverte en surface sous la litière (photo n° 5).

En zone de savane humide

(800 < P < 1600 mm) (photos n° 6 et n° 7)

L'influence de la couverture pédologique reste sensible mais s'exprime surtout par l'intermédiaire des propriétés de l'horizon humifère et de la surface. On constate également que l'infiltrabilité dépend largement de l'importance du couvert herbacé (POSS et VALENTIN, 1983). Cette zone est la plus complexe puisque l'infiltration y dépend à la fois des organisations pédologiques internes et des états de surface lesquels sont sujets à des variations saisonnières importantes (GIODA, 1983 ; PLANCHON, FRITSCH et VALENTIN, 1987 ; JANEAU et VALENTIN, 1987, à paraître).

En zone de savane sèche

(400 < P < 800 mm) (photo n° 8)

Dès 1979, COLLINET et LAFFORGUE montrent qu'il n'existe pas de relation nette entre l'aptitude au ruissellement et les organisations pédologiques internes. En revanche, les états de surface semblent déterminants pour l'hydrodynamique superficielle. Ces résultats ont été confirmés par les travaux d'ALBERGEL et BERNARD (1984 a et b), et de PONTANIER et al. (1986). L'analyse statistique des résultats acquis sur 48 parcelles au Burkina Faso a clairement établi que le pourcentage de couverture végétale auquel est liée l'activité mésofaunique, est le principal facteur explicatif de l'infiltration (ALBERGEL et al., 1986). Une analyse similaire, inédite à ce jour, effectuée sur 83 parcelles de la zone sahélienne, montre que 3 variables (pourcentage de couvert végétal, activité faunique et réorganisations de surface) suffisent à expliquer significativement, le coefficient d'infiltration mesuré sous pluies simulées, pour la zone de pluviométrie annuelle inférieure à 800 mm.

En zone sahélienne sensu stricto

(200 < P < 400 mm)

Les différents travaux (COLLINET et al., 1980 ; CHEVALLIER, 1982 ; CHEVALLIER et VALENTIN,

1984 ; GATHELIER et al., 1987 ; GATHELIER et IODA, 1986) montrent que ce sont les caractères d'états de surface qui conditionnent l'hydrodynamique. Toutefois, contrairement à la zone précédente, ce sont les organisations pédologiques superficielles qui ont un rôle prépondérant, le couvert végétal étant moins dense et beaucoup plus fugace.

En zone subdésertique
($P < 200$ mm)

Sous ces climats très arides, le couvert graminéen tend à se réduire dans l'espace et à n'occuper que peu de temps dans l'année (photo n°9), une part limitée de la surface du sol. Ce sont les seules réorganisations superficielles qui conditionnent l'infiltrabilité (VALENTIN, 1981; BRICQUET et al., 1987).

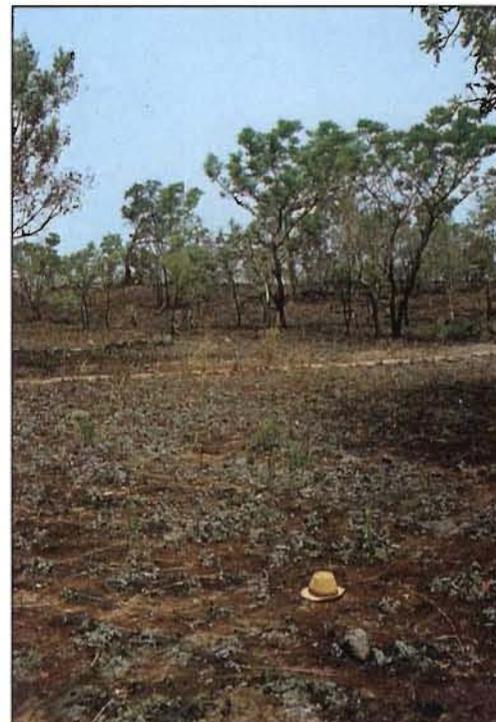
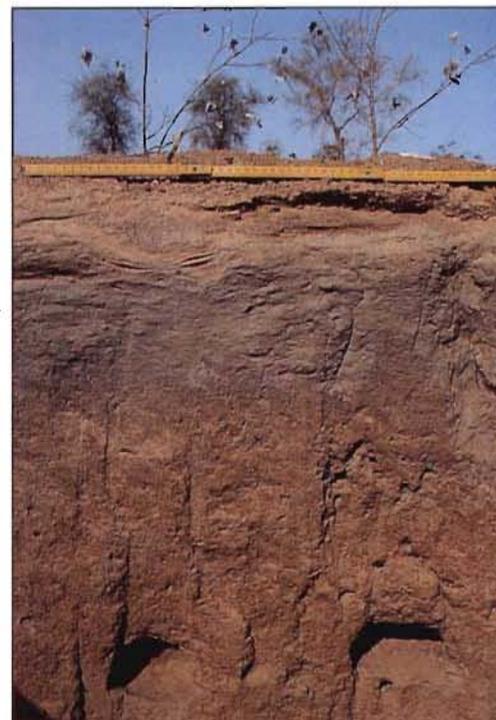


Photo 7.
Turricules de vers de terre en zone de savane humide, Parc National de la Comoé, Côte d'Ivoire



Photo 9.
Partie sommitale du sol en zone subdésertique, bassin versant d'Agassaghas, Niger.

Photo 8.
Partie sommitale d'un sol cultivé (coton) en zone de savane sèche, bassin versant de Bidi, Burkina Faso.



**SIMULATION DE PLUIE
ET HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE**

PRINCIPES ET CARACTÉRISTIQUES DU SIMULATEUR DE PLUIE

INTRODUCTION

Le simulateur de pluie utilisé au cours de cette étude (photo. n° 10) est une version très améliorée de celui de BERTRAND et PARR (1960). Le principal perfectionnement provient de la possibilité de modifier l'intensité en cours de pluie (ASSELINE et VALENTIN, 1978).

DESCRIPTION DE L'APPAREIL

Le simulateur (photo. n° 11) est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour en forme de tronc de pyramide de 4 mètres de haut (fig.1). Cette tour permet la fixation d'une bâche destinée à protéger la pluie simulée de l'action du vent. Le système d'arrosage est constitué d'un gicleur calibré, monté sur un

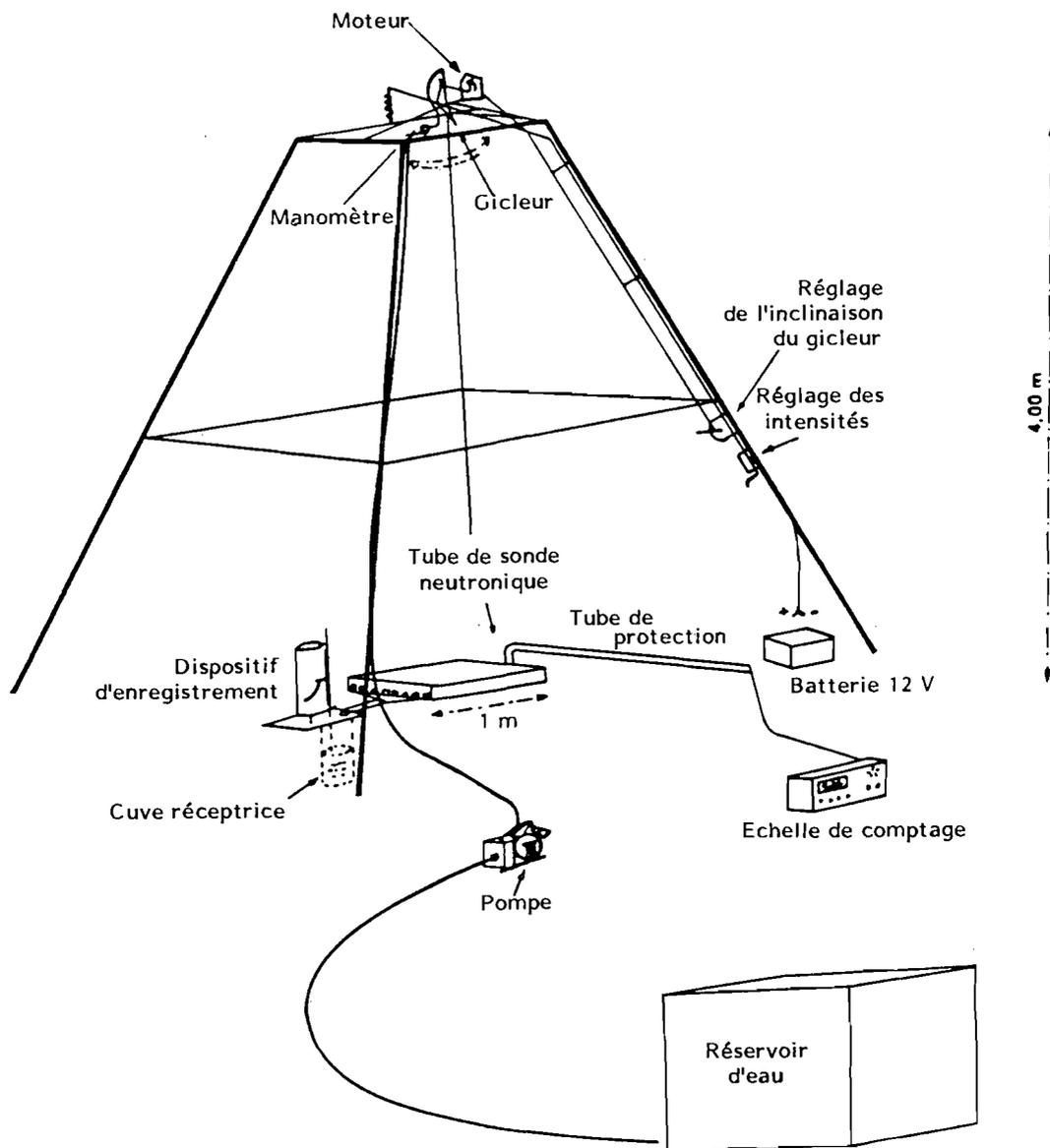


Figure 1
Schéma du mini-simulateur de pluie

bras mobile et alimenté en eau à débit constant par une motopompe (photo. n° 12). Un mouvement de balancement est imprimé au gicleur par un moteur. Un système de bras de levier réglable permet, en faisant varier l'angle de balancement, de modifier la surface arrosée au sol et, par là, l'intensité sur la parcelle d'un mètre carré étudiée, dans une gamme comprise entre 30 et 150 mm.h⁻¹. L'ensemble du mécanisme de balancement est monté sur un axe permettant de centrer le gicleur sur l'axe de la parcelle. Un manomètre, installé au sommet de la tour, permet de contrôler la pression d'admission de l'eau au gicleur et donc la constance du débit.

LA PARCELLE DE MESURES

La parcelle étudiée (1 m²) est limitée par un cadre métallique enfoncé dans le sol d'environ 5 cm. La face aval du cadre est percée de trous au ras du sol et est munie d'un canal collecteur qui recueille le ruissellement (photo. n° 13). Ce canal débouche dans une cuve, calibrée de façon à donner une élévation de 1 cm d'eau dans la cuve pour une lame ruisselée de 1 mm. Cette cuve est surmontée d'un limnigraphe* à grande vitesse de rotation qui permet d'enregistrer les volumes ruisselés avec une excellente précision puisqu'il est possible d'apprécier les temps à 10 secondes près et les lames ruisselées à 0,1 mm près (photo. n° 14).

L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DES PLUIES

L'énergie cinétique des pluies étant l'une des causes principales des réorganisations superficielles des sols, VALENTIN (1978) a fait l'étude détaillée de ce problème et a montré que l'énergie cinétique des pluies simulées est du même ordre de grandeur que celle des pluies naturelles et qu'elle en est d'autant plus proche que les intensités sont élevées (fig. 2).

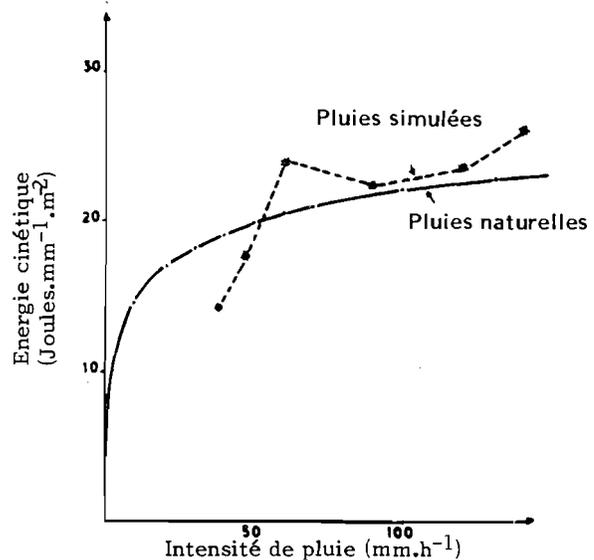


Figure 2. Comparaison des énergies cinétiques des pluies naturelles (Abidjan) et simulées. (d'après ASSELINE, VALENTIN 1978)



photo 10.
*Minisimulateur de pluie
sur un reg de la région d'Agadez, Niger.*

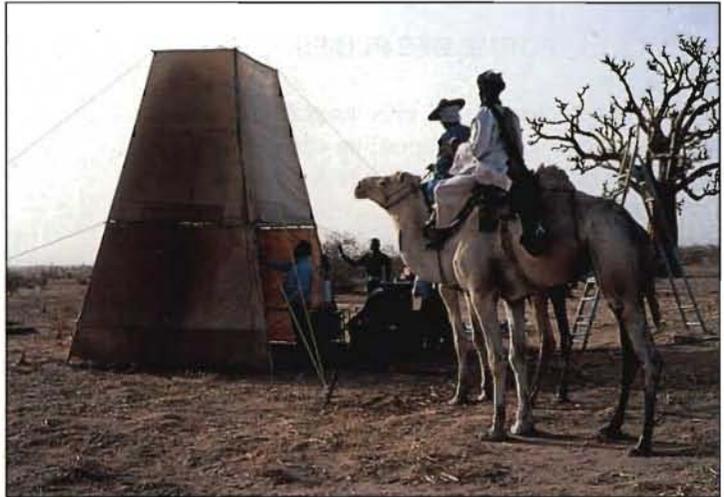


photo 11.
*Minisimulateur de pluie,
bassin versant de Gagara, Burkina Faso.*



photo 12.
Système d'aspersion du minisimulateur.

PROTOCOLES DES PLUIES SIMULÉES

On considère généralement que les principaux facteurs influençant le ruissellement et l'infiltration, outre la nature de l'averse que l'on peut caractériser par son intensité et sa durée sont : le type de sol ou les états de surface en zone sahélienne, l'état d'humectation initial du sol, la pente, la couverture végétale (englobée dans l'état de surface) et l'activité faunique. Les premières campagnes de mesures sous pluies simulées ont permis de montrer que sur des parcelles de 1 mètre de long, la pente n'avait pas d'influence sensible (CASENAVE et GUIGUEN, 1978). Le dispositif expérimental et le protocole des mesures doivent permettre de caractériser, avec le minimum de pluies, le rôle de chacun des facteurs susceptibles d'influencer l'infiltration.

FORME DES PLUIES

Afin d'approcher au plus près les phénomènes naturels, nous nous sommes imposé un certain nombre de contraintes dans la définition des protocoles, quant à la forme et au nombre des pluies :

- averse à pointe d'intensité unique,
- la taille de la pluie ne doit pas dépasser la hauteur de la pluie journalière de fréquence annuelle ou décennale. Ces hauteurs étant déterminées au poste pluviométrique de longue durée le plus proche du site des mesures,
- le total des pluies sur une parcelle ne doit pas excéder la valeur moyenne de la pluviométrie annuelle,
- les composantes intensité - durée - fréquence doivent respecter celles communément admises pour la région.

Pour toutes les parcelles testées dans le cadre de cette étude, les protocoles ont été fondés sur une succession de pluies simulées "annuelles" et "décennales". Etant donnée la zone climatique couverte, les valeurs de ces pluies changent en fonction de la position géographique des sites testés. La pluie simulée de type "annuel" passe ainsi de 30 mm à Agadez à 62.3 mm pour les bassins de Boulssa, du Kuo ou de Kazanga et la pluie de type "décennal" varie de 50 mm à Agadez, à 115 mm pour le bassin de Banigorou. On trouvera en annexe la succession des intensités qui compose ces différentes pluies pour chaque bassin étudié. Chaque parcelle est soumise à une succession d'averses (généralement six) séparées par des temps de ressuyage variables, afin d'étudier l'influence de l'état d'humectation initial du sol. Bien qu'ils aient légèrement varié au cours du temps, l'amélioration progressive des connaissances nous incitant à les modifier, les protocoles des averses

sur une parcelle ont toujours été de la forme de celui présenté ci-après, qui est celui appliqué sur les parcelles du bassin de Banigorou (Niger).

Tableau 3
Exemple de protocole de simulation de pluies.

Pluie (mm)	Temps de ressuyage (heures)	IK*
115		0
	24	
55		69,8
	72	
55		27,8
	24	
55		50,2
	84	
55		18,3
	24	
115		44,5

*IK = indice pluviométrique dont le mode de calcul est explicité dans ce chapitre (§ 3).

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Comme nous l'avons déjà signalé, un des principaux résultats des études sous pluies simulées a été la mise en évidence de l'influence primordiale et même quasi exclusive des états de surface sur l'hydrodynamique superficielle dans toute la zone sahélienne. Une des conséquences a été le développement d'une méthode cartographique de ces états de surface dont la technique sera explicitée au chapitre 17. Cette méthode cartographique distingue deux niveaux d'organisation :

- la *surface élémentaire*, considérée comme homogène quant à son comportement hydrodynamique,
- l'*état de surface* qui correspond, soit à une seule surface élémentaire, soit, à la juxtaposition ou à l'association de plusieurs. Ce concept, développé plus loin (chapitre 13, §2) est à la base de la définition des unités cartographiques dont les limites peuvent être tracées à partir des relevés de terrain et des photographies aériennes.

Lors des mesures sous pluies simulées, chaque par-



photo 13.
*Parcelle expérimentale sous simulation de pluie,
culture de mil,
région de la mare d'Oursi, Burkina Faso.*

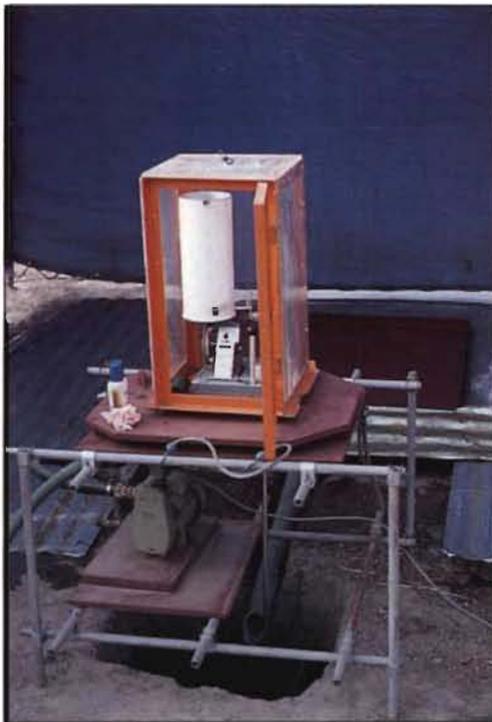


photo 14.
Dispositif d'enregistrement du ruissellement.



photo 15.
*Dispositif de mesure neutronique
de l'humidité du sol.*

celle permet de tester le comportement d'une surface élémentaire. Un site expérimental regroupe généralement plusieurs parcelles ; il correspond alors à une unité cartographique.

MESURE DE L'HUMIDITÉ DU SOL

Au début des expérimentations, les mesures de ruissellement et d'infiltration sur les parcelles étaient couplées à des mesures de l'humidité du sol effectuées par trois méthodes différentes : méthode gravimétrique, sonde à neutrons (photo.n° 15) et chocs thermiques. Il s'est avéré, malheureusement, qu'aucune de ces trois méthodes ne donne de résultats satisfaisants dans tous les cas. Très fréquemment, la présence de gravillons dans le sol entraîne, en effet, des difficultés au niveau des mesures.

Cette déficience des méthodes de mesure directes de l'humidité du sol, nous a incités à évaluer l'état d'humectation par un indice pluviométrique qui tienne compte de la hauteur des pluies et de leur répartition dans le temps. Cet indice a, de plus, l'avantage de pouvoir être calculé à partir d'une série pluviométrique d'un poste de référence proche du site étudié.

Nous avons adopté un indice de forme exponentielle répondant à l'équation :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t}$$

où :

IK_n = valeur de l'indice avant la pluie n

IK_{n-1} = valeur de l'indice avant la pluie n-1

P_{n-1} = hauteur de la pluie n-1

t = temps, en fraction de jours, séparant la fin de la pluie n-1 du début de la pluie n

α = coefficient d'ajustement = 0,5

LES VARIABLES HYDRODYNAMIQUES MESURÉES SOUS PLUIES SIMULÉES

LES QUATRE PHASES OBSERVÉES SOUS PLUIE SIMULÉE

Lors d'une pluie simulée, on enregistre la courbe des volumes ruisselés cumulés. Les variations de pente de cette courbe permettent le calcul des débits de ruissellement instantanés qui peuvent être reportés en fonction du temps pour dessiner l'hydrogramme de ruissellement (fig. 3).

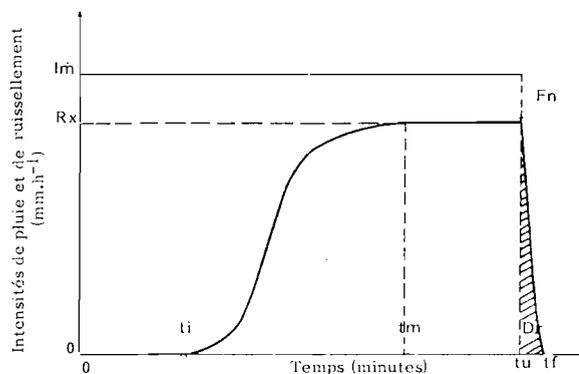


Figure 3.
Hydrogramme théorique de ruissellement sous averse d'intensité constante

Pendant la durée de la pluie simulée, on observe quatre phases différentes dont l'analyse a été entreprise par LAFFORGUE (1977), complétée par LAFFORGUE et CASENAVE (1980).

Phase d'imbibition

Du début de la pluie jusqu'à un temps t_i , aucun ruissellement n'apparaît. C'est la phase d'imbibition caractérisée par la hauteur de pluie, infiltrée ou stockée en surface, dite pluie d'imbibition, P_i . L'infiltration est d'abord totale, l'intensité potentielle d'infiltration $F(t)$ étant, en chaque point de la parcelle, supérieure à l'intensité de la pluie. Le sol s'humectant progressivement, la capacité d'infiltration diminue et devient en certains points inférieure à l'intensité de la pluie. L'eau commence alors à ruisseler et à remplir les dépressions de la parcelle. Au temps t_i , les flaques débordent et l'eau qui se met en mouvement parvient à l'exutoire. Pendant cette phase d'imbibition :

$$\begin{aligned} L_r(t) &= 0 \\ D_m(t) &= 0 \\ P_u(t) - L_i(t) - S(t) &= 0 \end{aligned}$$

avec :

- $L_r(t)$ = lame ruisselée à l'instant t
- $D_m(t)$ = Détéction superficielle mobilisable à l'instant t
- $P_u(t)$ = Hauteur de pluie à l'instant t
- $L_i(t)$ = lame infiltrée à l'instant t
- $S(t)$ = lame stockée en surface à l'instant t

Régime transitoire

Au début du ruissellement, l'hydrogramme prend une forme de S allongé qui traduit la diminution de l'intensité d'infiltration. Si toutes les flaques débordent, la totalité de la superficie de la parcelle participe au ruissellement. La hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement à la surface (D_m) augmente. Cette phase correspond à un régime transitoire pendant lequel

$$I(t) - R(t) - F(t) - \frac{d D_m}{dt} - \frac{d S}{dt} = 0$$

où :

- $I(t)$ = Intensité de la pluie à l'instant t
- $R(t)$ = Intensité du ruissellement à l'instant t
- $F(t)$ = Intensité d'infiltration à l'instant t

Régime d'écoulement permanent

A partir d'un temps t_m , apparaît un palier de ruissellement dont l'intensité a atteint un maximum. L'intensité d'infiltration est alors minimale. Il s'est établi un régime d'écoulement permanent. Au changement d'intensité de la pluie, ce régime permanent cesse durant un intervalle de temps assez bref au cours duquel les intensités de ruissellement et d'infiltration changent jusqu'à un nouvel équilibre. On retrouve alors un palier qui correspond à un nouveau régime permanent caractérisé par :

$$\begin{aligned} R(t) &= R_x \\ F(t) &= F_n \\ \frac{d D_m}{dt} &= 0 \\ \frac{d S}{dt} &= 0 \end{aligned}$$

avec :

- $I - R_x - F_n = 0$
- R_x = intensité maximale de ruissellement
- F_n = intensité minimale d'infiltration

Phase de vidange

Lorsque la pluie cesse au temps t_u , le ruissellement décroît jusqu'au temps t_f où il s'annule. C'est la phase de vidange. La quantité d'eau qui s'écoule représente la fraction non infiltrée de la détention superficielle mobilisable. Elle répond à l'équation :

$$Lr(t_f) - Lr(t_u) = Dm(t_u) + S(t_u) - S(t_f) + Li(t_u) - Li(t_f).$$

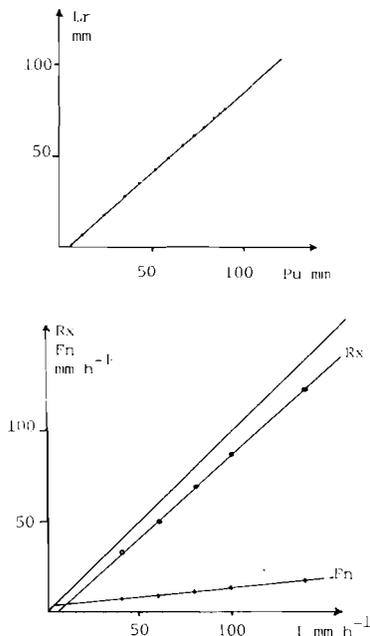
VARIABLES CARACTÉRISTIQUES DE L'INFILTRATION

Pluie d'imbibition

Comme nous l'avons déjà vu, il s'agit de la quantité d'eau infiltrée ou accumulée en surface avant le déclenchement du ruissellement. Cette valeur varie, bien entendu, avec l'état d'humectation initial du sol. Dans cet ouvrage, nous avons considéré deux valeurs de P_i , la première, P_{is} , correspondant à un sol très sec (pF supérieur à 4,2, la première pluie du protocole étant simulée après plusieurs mois de saison sèche), la seconde, P_{ih} , pour un sol très humecté (pratiquement saturé, pF très inférieur à 3) correspond à la pluie ayant la plus forte valeur de I_K . Pour la plupart des sols testés, le ruissellement débutant au cours de la première intensité de la pluie, les valeurs de P_i correspondent à cette intensité. Pour une intensité plus faible, il faudrait augmenter les valeurs de P_i et les diminuer pour une intensité plus forte.

Coefficient d'infiltration

A chaque pluie simulée correspond une lame infiltrée $L_i = P_u - (L_r + D_r)$



où :

- L_i = lame infiltrée pendant la durée de la pluie en mm
- P_u = hauteur totale de la pluie simulée en mm
- L_r = lame ruisselée pendant la durée de la pluie en mm
- D_r = détention superficielle récupérable en mm
- = fraction du ruissellement mesurée après l'arrêt de la pluie.

A cette lame infiltrée correspond un coefficient d'infiltration, exprimé en % :

$$k_i = \frac{L_i \times 100}{P_u}$$

Pour une parcelle donnée, on peut définir un coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole :

$$K_i = \frac{S L_i \times 100}{S P_u}$$

où :

- $S L_i$ = Lame infiltrée cumulée des différentes averses du protocole,
- $S P_u$ = Hauteur totale des averses.

Pour être comparables, les K_i de différentes parcelles, devraient être calculés à partir de protocoles rigoureusement identiques. Cela n'a pas été le cas dans notre étude, où les protocoles ont varié légèrement d'un site à un autre, soit pour tenir compte des conditions climatiques locales, soit à la suite d'améliorations apportées à ces protocoles. Les variations étant cependant limitées, les valeurs de K_i donnent un reflet fidèle des capacités d'infiltration des différents états de surface.

Pour une parcelle donnée, chaque averse permet de déterminer la relation entre la lame ruisselée et la hauteur de la pluie (fig 4).

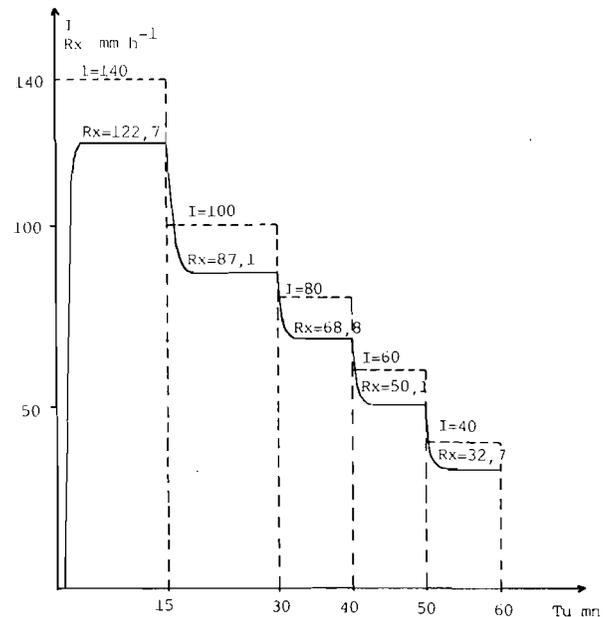


Figure 4. Pluie à intensité variable : relations $L_r(P_u)$, $R_x(I)$, $F_n(I)$ d'après

La courbe qui exprime cette relation peut être assimilée à une droite sans erreur notable, la partie incurvée, caractéristique du déficit de saturation du sol en début de pluie, étant toujours très brève (CASENAVE, 1982). Cette relation correspond à un état d'humectation du sol donné, caractérisé par la valeur de l'indice IK au début de la pluie. Le report de l'ensemble des droites $L_r(P_u)$, correspondant à la série des pluies sur une même parcelle, montre que la pente de ces droites varie concomitamment aux valeurs de IK. Pour chaque parcelle, il existe une relation linéaire entre la lame ruisselée et l'indice IK :

$$L_r = a IK + b \quad (1)$$

Les coefficients a et b de cette équation varient de façon linéaire avec la hauteur de la pluie. Très fréquemment, les points représentatifs de ces liaisons s'alignent sur deux tronçons de droites (fig.5).

Ces changements de pente des relations $a(P_u)$ ou $b(P_u)$ correspondent à des seuils pluviométriques à partir desquels l'influence du facteur IK décroît. Ces résultats corroborent ceux de VALENTIN (1981) qui a montré qu'au delà d'une certaine quantité de pluie, l'intensité d'infiltration devient constante et égale à la valeur du coefficient d'infiltration à saturation K_s . Si on introduit dans l'équation(1), les valeurs $a(P_u)$ et $b(P_u)$, l'équation exprimant les liaisons entre L_r , P_u et IK devient :

$$L_r = A P_u + B IK + C P_u IK + D$$

A cette lame ruisselée correspond une lame infiltrée :

$$L_i = P_u - (L_r + D_r)$$

$$L_i = P_u - (A.P_u + B.IK + C.P_u.IK + D + D_r)$$

C'est cette relation qui caractérise l'aptitude à l'infiltration d'une surface élémentaire. Afin de comparer entre elles ces aptitudes pour les différents états de surface étudiés, nous utilisons dans cet ouvrage les valeurs K_{i0} et K_{i20} qui sont les coefficients d'infiltration

$$K_i = \frac{L_i \times 100}{P_u}$$

pour une pluie de 50 mm et pour deux états d'humectation du sol donnés. Le premier K_{i0} correspond à un $IK = 0$ et donc à des sols très secs. Le second K_{i20} calculé pour un $IK = 20$, correspond à des sols très humectés, la valeur $IK = 20$ étant déjà une valeur très forte pour une série de pluies naturelles (SEGUIS, 1986) en zone sahélienne.

Intensité limite de ruissellement

De même que pour une pluie donnée, on peut tracer une relation $L_r(P_u)$, une averse simulée comportant plusieurs intensités permet de tracer les droites $R_x(I)$ ou $F_n(I)$ (CASENAVE, 1982).

Pour chaque parcelle, le report des relations $R_x(I)$

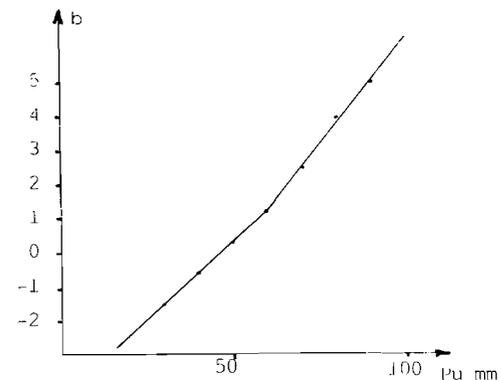
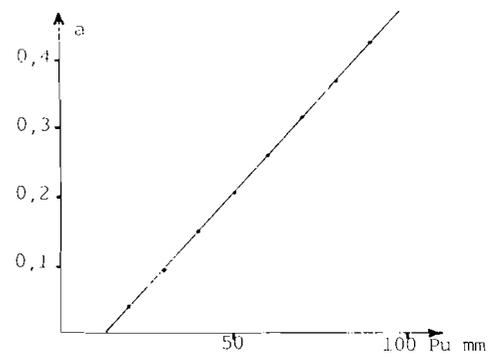
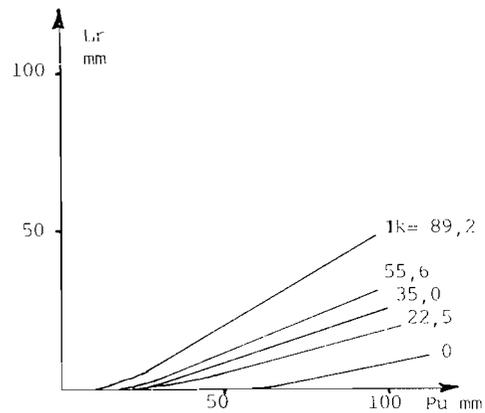


Figure 5.
Relation $L_r(P_u, IK)$, exemple de Binnde, parcelle 3
(ALBERGEL et al., 1986)

correspondant à chacune des pluies donne un faisceau de droites plus ou moins parallèles dont l'abscisse à l'origine est fonction de l'indice IK et représente l'intensité limite de la pluie, I_l , au-dessous de laquelle il est impossible d'obtenir un ruissellement. Chaque droite a une équation de la forme $R_x = K (I - I_l)$.

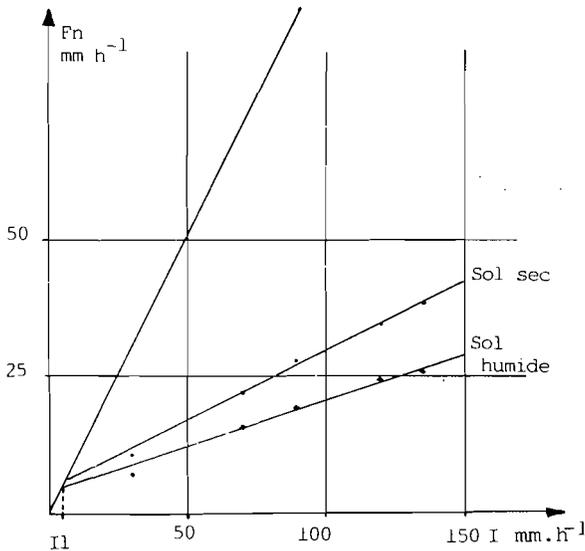


Figure 6.

Détermination de I_1 , exemple de Boulsa, parcelle 1 (ALBERGEL, 1987)

Pour toutes les droites d'une même parcelle, I_1 peut s'exprimer en fonction de IK , ce qui donne une équation de type :

$$Rx = a I + b IK + c$$

qui caractérise la parcelle et donc un état de surface donné.

A toute conclusion sur le ruissellement maximal Rx , correspond une conclusion similaire mais de sens opposé sur l'intensité minimale d'infiltration F_n . Aux droites $Rx(I)$ correspondent des droites $F_n(I)$ qui coupent la première bissectrice à la valeur de I_1 pour un état d'humectation du sol donné. Pour la droite $F_n(I)$ correspondant au sol le plus humecté (plus forte valeur de IK) du protocole (le protocole des pluies est tel que pour cette valeur de IK on peut considérer que le sol est très proche de la saturation) la valeur de I_1 peut être assimilée au coefficient d'infiltration à saturation. C'est cette valeur que nous avons retenue dans notre étude comme une des caractéristiques de l'infiltration (fig.6).

VALIDITÉ DES MESURES SOUS PLUIES SIMULÉES

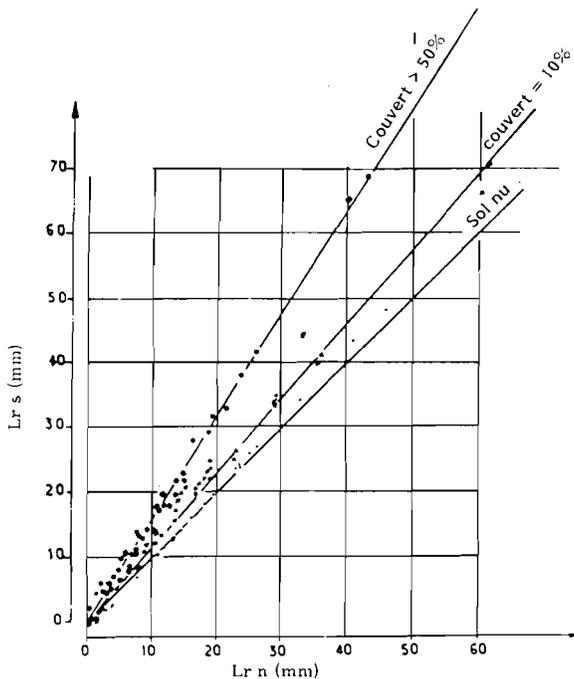


Figure 7.

Comparaison des résultats obtenus sous pluies naturelles et simulées (d'après THEBE, 1987).

La fiabilité et la fidélité du simulateur de pluie quant à la mesure du ruissellement et de l'infiltration ont été testées au cours d'une étude sur un bassin soudano-sahélien du Nord-Cameroun (ALBERGEL et THEBE, 1986). Les principales conclusions de cette étude sont :

- les ruissellements mesurés sur trois parcelles d'un même site, au cours de deux saisons sèches différentes, donnent un échantillon statistique homogène dont la variabilité reste de l'ordre de grandeur de la précision des mesures,
- sur les parcelles sans végétation, le ruissellement mesuré sous pluie simulée est équivalent à celui mesuré sous pluie naturelle, il est surestimé sur les sites couverts d'une strate herbacée importante.

Cette surestimation reste faible (inférieure à 10%) pour les faibles couvertures végétales habituelles du Sahel, mais peut atteindre 30% si la couverture végétale dépasse 50% de la surface de la parcelle (figure 7). Cette diminution du ruissellement en saison des pluies résulte de la destruction locale des organisations superficielles sous l'effet des germinations et de l'activité de la mésofaune.

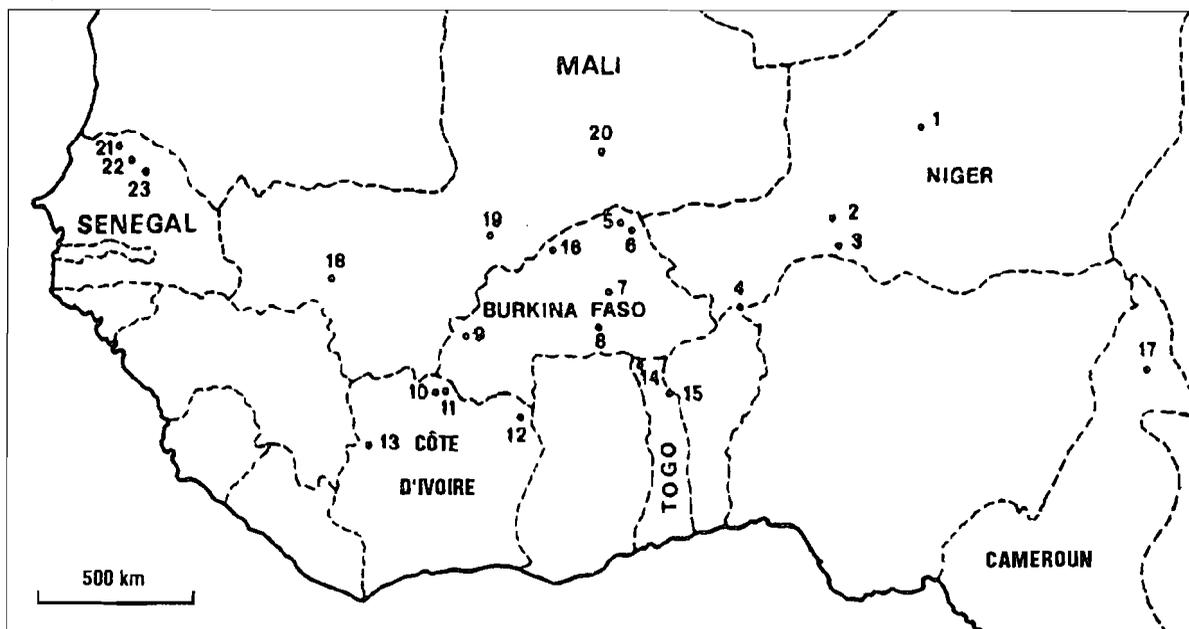
REPRÉSENTATIVITÉ DES SITES ÉTUDIÉS

SCHÉMA GÉNÉRAL DES RÉGIMES PLUVIOMÉTRIQUES EN AFRIQUE SUBTROPICALE ET INTERTROPICALE

On trouvera, sur la carte n° 2, la localisation des sites étudiés qui appartiennent pour la plupart à des petits bassins versants représentatifs. On remarquera que certains de ces sites, dépassent largement la "frontière" méridionale du Sahel. Outre que ces études ont parfois une finalité autre que celle exposée dans cet ouvrage, ce sont ces sites qui ont permis de fixer les limites des changements des facteurs conditionnels de l'infiltration. De là, résulte notre définition du Sahel : zone où l'hydrodynamique superficielle est sous la dépendance quasi-exclusive des états de surface (200 mm < P < 750-850 mm).

LES GRANDS TYPES DE CLIMAT EN AFRIQUE TROPICALE

Les caractéristiques du climat sont sous la dépendance de la circulation de masses d'air dont le moteur est le bilan d'énergie nette du système terre-atmosphère. Ce bilan, positif à l'équateur et négatif aux pôles, implique une redistribution de l'énergie. Du fait de l'énergie reçue, l'équateur est une zone d'ascendance des masses d'air. En s'élevant, l'air se détend et se refroidit, retombe au niveau d'anticyclones subtropicaux puis converge vers l'équateur (alizés). L'équateur météoro-



Bassins versants

- 1 Agassaghas
- 2 Kountkouzout
- 3 Galmi
- 4 Banigorou
- 5 Polaka - Jalafanka
- 6 Gagara
- 7 Koghneré
- 8 Binnde - Kazanga
- 9 Kuo
- 10 Waraniene

- 11 Worossantiakaha
- 12 Varale
- 13 Booro-Borotou
- 14 Nadjoundi
- 15 Hidenwou
- 16 Bidi
- 17 Mouda
- 18 Dounfing
- 19 Koumbaka
- 20 Tin Adjar

Forages du Ferlo

- 21 Tarki
- 22 Tessekre
- 23 Revane

Carte n° 2
Carte de situation des sites étudiés

logique (zone de convergence des alizés) qui ceinture le globe à la latitude de 5°N durant l'hiver boréal, remonte vers 10°N pendant l'été boréal.

Le climat en Afrique intertropicale dépend des relations entre quatre grands anticyclones subtropicaux plus ou moins permanents :

- **L'anticyclone des Açores**, qui donne naissance aux alizés du nord, vents frais, riches en vapeur d'eau et localisés dans les parties basses de l'atmosphère. Ils n'ont une influence que sur les franges ouest de la Mauritanie et du Sénégal.
- **L'anticyclone du Sahara** qui donne naissance à un vent sec et chaud, de secteur est, "l'harmattan". Cet anticyclone n'est permanent que dans les hautes couches de l'atmosphère.
- **L'anticyclone de Sainte-Hélène**, responsable de la "mousson", vent maritime tiède et très humide, de direction sud-ouest.

- **L'anticyclone du Transvaal** qui est à l'origine de l'alizé austral, vent humide et chaud.

La mousson joue le rôle de masse froide par rapport à l'harmattan et à l'alizé boréal. Ces masses d'air, de température et d'humidité différentes, sont séparées par des fronts :

- **Le front des alizés**, entre alizés des Açores et harmattan, de direction nord-sud qui se déplace parallèlement aux côtes du Sénégal et de la Mauritanie. Ce front est relativement peu actif et n'a que peu d'influence sur le climat sahélien.
- **Le front intertropical (FIT)** qui est la trace au sol de la limite séparant les masses d'air chaud et sec provenant du nord (harmattan) de celles moins chaudes et humides provenant du sud (mousson). La surface de contact entre les deux masses d'air peut être assimilée à un plan incliné s'élevant en pente douce vers le sud. Le FIT suit une direction générale est-ouest et se déplace

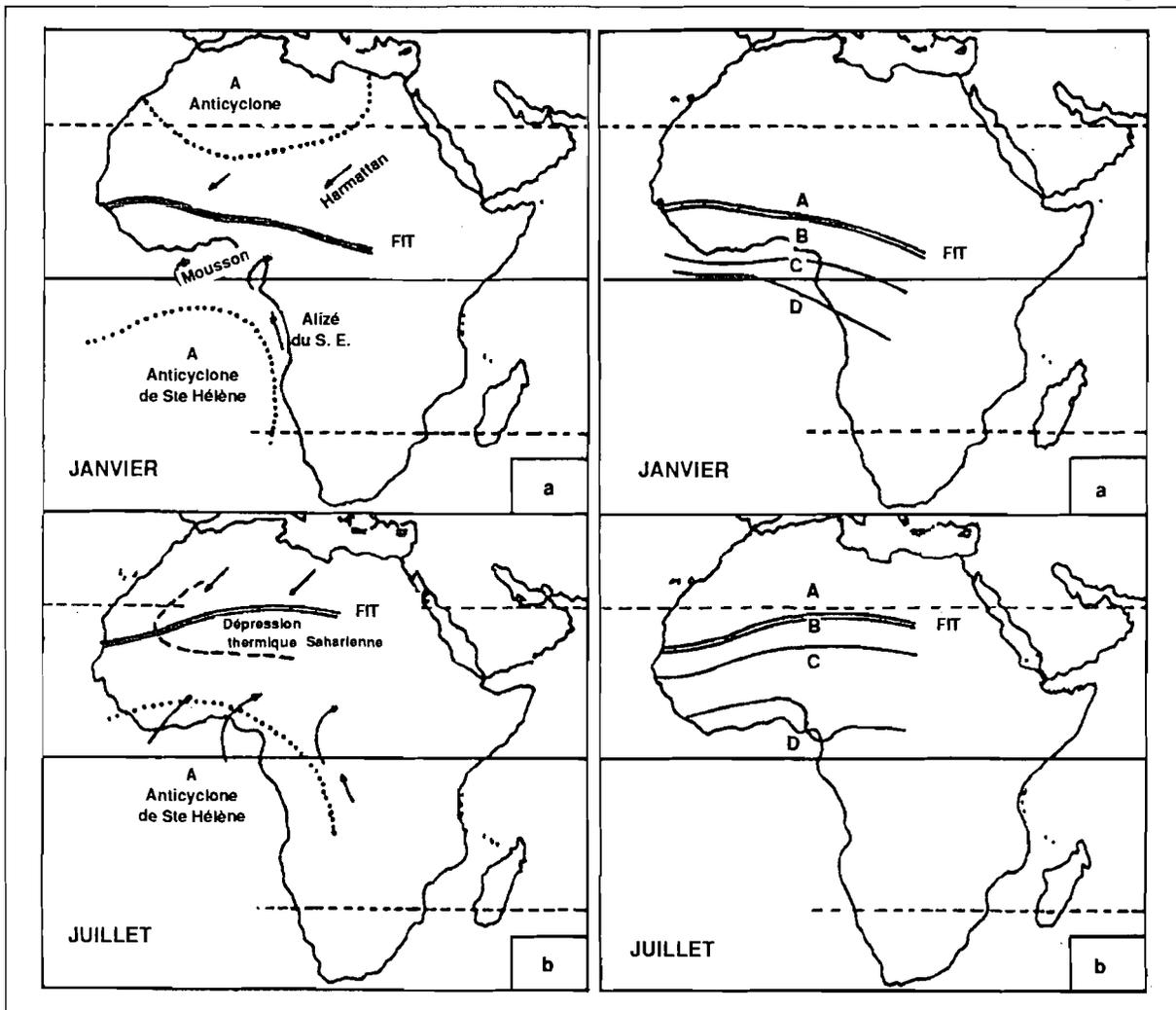


Figure 8.
Déplacements du Front Inter Tropical (F.I.T.)

au cours de l'année en accompagnant, avec un décalage de quelques semaines, les oscillations apparentes du soleil autour de l'équateur.

En janvier, le FIT occupe sa position la plus méridionale : il passe au nord de Conakry, au tiers sud de la Côte d'Ivoire, s'infléchit à l'est pour passer vers Yaoundé et le centre de la grande forêt inondée qui couvre la moitié nord du Congo. A partir de février-mars, il remonte lentement vers le nord et occupe fin août sa position la plus septentrionale qui correspond sensiblement au 20^{ème} parallèle. Au début de septembre, il redescend vers le sud pour rejoindre la position de janvier (fig.8).

En fonction de leur position par rapport au FIT, on peut définir six grandes zones de temps différents (fig 9) :

- Quand l'épaisseur de la mousson est maximale, les formations nuageuses plus instables donnent lieu à des pluies beaucoup plus prolongées. Ce sont des averses à caractère continu qui correspondent sensiblement au milieu de la saison des pluies mais que l'on observe rarement au nord de l'isohyète 1000 mm.

- Enfin à l'extrême sud, il existe une masse d'air d'origine australe qui conduit à un ciel couvert sans pluies. C'est la saison sèche de la zone équatoriale.

Ce schéma général met en évidence l'importance capitale pour le Sahel de la latitude atteinte vers le nord par le FIT qui détermine :

- le début, la durée et la fin de la saison des pluies,
- la hauteur des précipitations,
- la nature même de ces précipitations.

Le phénomène simple d'oscillation de masses d'air

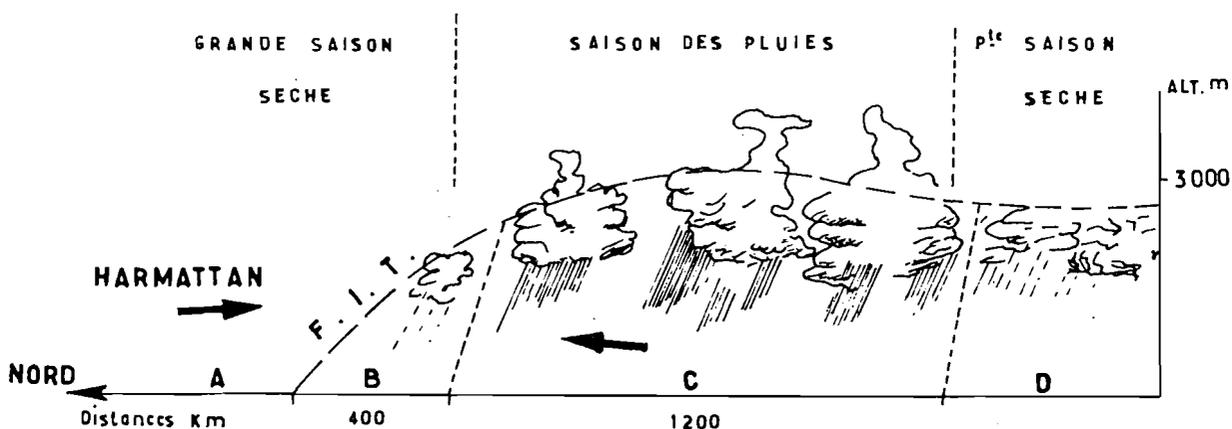


Figure 9.
Schéma des zones de temps en fonction de leur position par rapport au F.I.T.

- Au nord du FIT, il y a un affaiblissement progressif et lent des masses d'air qui interdit tout développement des nuages : c'est la saison sèche.
- Au sud du FIT, sur une distance de 300 à 400 km, l'épaisseur de la mousson n'est pas suffisamment importante pour qu'il y ait un développement convectif puissant ; il se forme simplement quelques formations nuageuses et le degré hygrométrique au sol est assez élevé.
- Plus au sud, lorsque l'épaisseur de la mousson atteint 700 à 800 m, il se produit les premières averses qui correspondent à des séries de grains suivant une ligne est-ouest.
- Lorsque l'épaisseur de la mousson atteint 2.000 m, des lignes de grains se forment appelées "tornades" qui se déplacent d'est en ouest. Ces pluies sont beaucoup plus intenses que dans la zone précédente.

permet de schématiser la répartition spatio-temporelle des précipitations au sud du Sahara. Le climat suit une variation régulière du nord au sud qui est marquée surtout par l'importance relative des saisons sèches.

- Au nord du 10^{ème} parallèle environ, il existe une seule saison sèche et une seule saison des pluies par an. Pour une latitude donnée, la durée de la saison des pluies et la hauteur de pluie annuelle dépendent du laps de temps séparant la montée et la descente du FIT.

En *régime désertique* (moins de 300 mm de pluie annuelle), la saison des pluies ne dure que deux mois, de la mi-juillet à la mi-septembre.

En *régime sahélien* (pluie annuelle de 300 à 750 mm), elle s'étend sur trois à quatre mois, le mois d'août étant le plus arrosé, le reste de l'année ne comportant généralement aucune averse.

En *régime tropical pur* (750-1200 mm), la saison des

pluies s’allonge et passe à cinq mois, voire six à la limite sud de cette zone.

Entre le 9^{ème} parallèle et l’équateur, soit au sud de la position nuageuse la plus méridionale du FIT, l’air continental ne fait que de très brèves incursions dans le milieu de l’hiver (“coup d’harmattan”). Le climat passe progressivement vers le sud à deux saisons sèches et deux saisons des pluies, la transition entre régime tropical et régime équatorial étant insensible. En descendant vers le sud, la saison des pluies du régime tropical s’allonge et marque parfois un léger fléchissement en juillet-août (*régime tropical de transition*) ; puis le dédoublement de la saison des pluies apparaît nettement (*régime équatorial de transition*) et vers l’équateur météorologique, les deux saisons des pluies et les deux saisons sèches arrivent à être sensiblement symétriques, tout au moins en année moyenne (*régime équatorial pur*).

LE CLIMAT DE LA ZONE SAHÉLIENNE

Toute la zone sahélienne, au sens hydrologique, est soumise à un climat de type tropical dont nous avons vu qu’il est caractérisé par une saison sèche unique et une seule saison des pluies, toutes deux bien marquées.

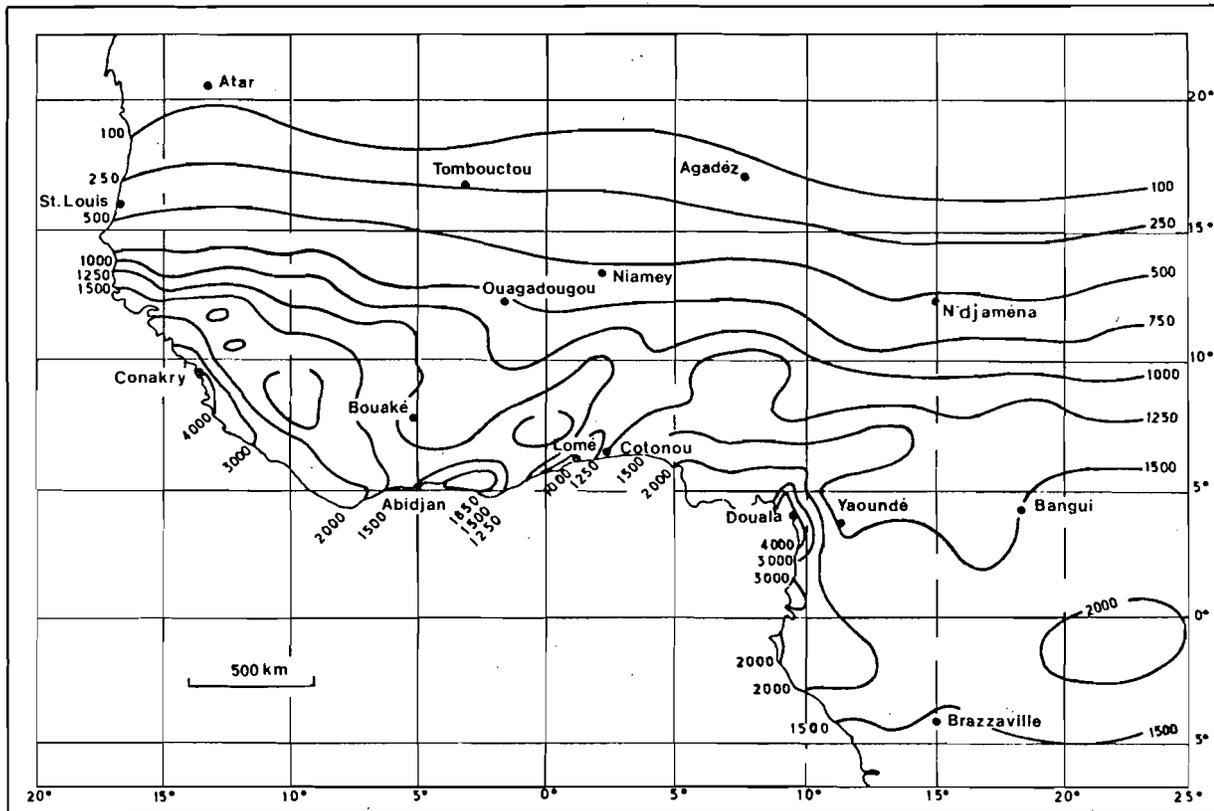
La variable climatique qui conditionne le plus les états de surface est, bien sûr, la pluviométrie, c’est pourquoi nous axerons cette rapide esquisse du climat sahélien sur les caractéristiques des précipitations.

Les précipitations annuelles

La pluviométrie annuelle peut être caractérisée par le réseau d’isohyètes représenté sur la carte n° 3. Comme nous l’avons vu, la pluviométrie annuelle croît du nord au sud et les isohyètes suivent approximativement les parallèles avec une légère inclinaison vers le sud lorsque l’on va de l’ouest à l’est. Ce tracé des isohyètes n’est, bien sûr, qu’une schématisation de la pluviométrie annuelle, la hauteur des précipitations pouvant varier dans de larges proportions entre des points voisins. De plus, l’irrégularité interannuelle est telle que la position des isohyètes peut fluctuer de 200 à 300 km selon la période de référence, cette fluctuation s’effectuant, à l’échelle d’une vie humaine, largement dans les deux sens.

Les variations annuelles

Le climat tropical, tel qu’il existe à Niamey ou N’Djamena par exemple, est caractérisé par la répartition suivante des saisons au cours de l’année (fig. 10) :



Carte n° 3.
Pluviométrie annuelle et réseau d’isohyètes

- En janvier et février, une saison très sèche, généralement sans aucune précipitation. Parfois on observe en février ou mars, une faible averse dite "pluie des mangues" qui dépasse rarement 20 mm.
- En avril, débutent les premières pluies, précédées de tornades sèches.
- En mai et juin, la saison des pluies commence. Les précipitations sont de l'ordre de 40 à 80 mm par mois.
- En juillet, août, septembre, c'est le coeur de la saison des pluies. Les précipitations varient entre 100 et 200 mm par mois avec un paroxysme généralement en août.
- Pendant la première quinzaine d'octobre, on note encore quelques pluies, puis c'est la saison sèche qui dure près de six mois, avec un minimum absolu en décembre, où, à Niamey, jamais aucune pluie n'a été observée sur la période 1905-1983.

Plus on va vers le nord, plus la durée de la saison des pluies diminue, elle est de deux mois (15 juillet au 15 septembre) en régime subdésertique et elle se réduit à quelques pluies isolées au mois d'août, certaines années, en régime désertique. Vers le sud, au contraire, la saison sèche est de plus en plus courte et la saison des pluies s'allonge.

Irregularité interannuelle de la pluviométrie : les sécheresses

L'irregularité interannuelle est couramment représentée par le coefficient K3, rapport entre les hauteurs des précipitations annuelles de l'année décennale humide et de l'année décennale sèche. La valeur de ce coefficient croît régulièrement du sud au nord, en sens inverse de la pluviométrie annuelle. De l'ordre de 1,5 vers l'isohyète 1500 mm, il peut atteindre 2 vers l'isohyète 500 mm et 2,5 voire 3 au-dessous de l'isohyète 250 mm (fig.11).

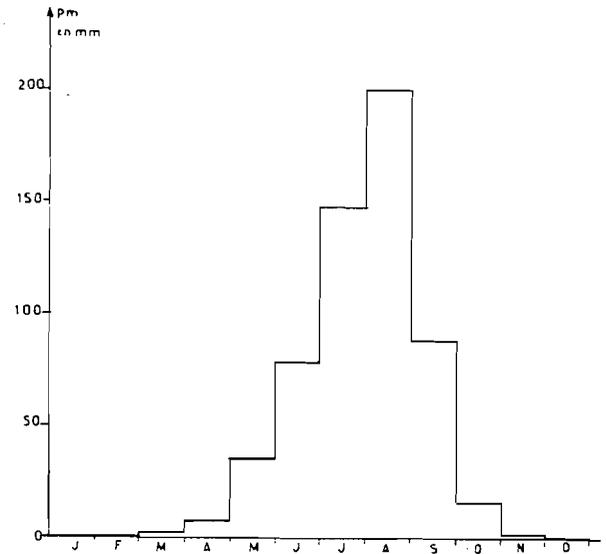


Figure 10. Pluviométrie moyenne mensuelle à Niamey (période 1905 à 1983)

Une des conséquences de cette forte irregularité interannuelle est l'apparition fortuite de périodes de sécheresse dont les effets sont catastrophiques dans la zone sahélienne où l'équilibre entre l'homme et son environnement s'avère toujours précaire. Les ravages occasionnés par la dernière sécheresse qui affecte le Sahel depuis 1968, avec deux périodes paroxysmales en 1972-73 et 1983-84, ainsi que les bouleversements socio-économiques qui en ont résulté, ont été largement rapportés par les médias. Ils ont donné lieu également à de très nombreuses études scientifiques dont une bibliographie abondante peut être trouvée dans SIRCOULON (1976, 1984-85), F.A.O. (1973) ou la

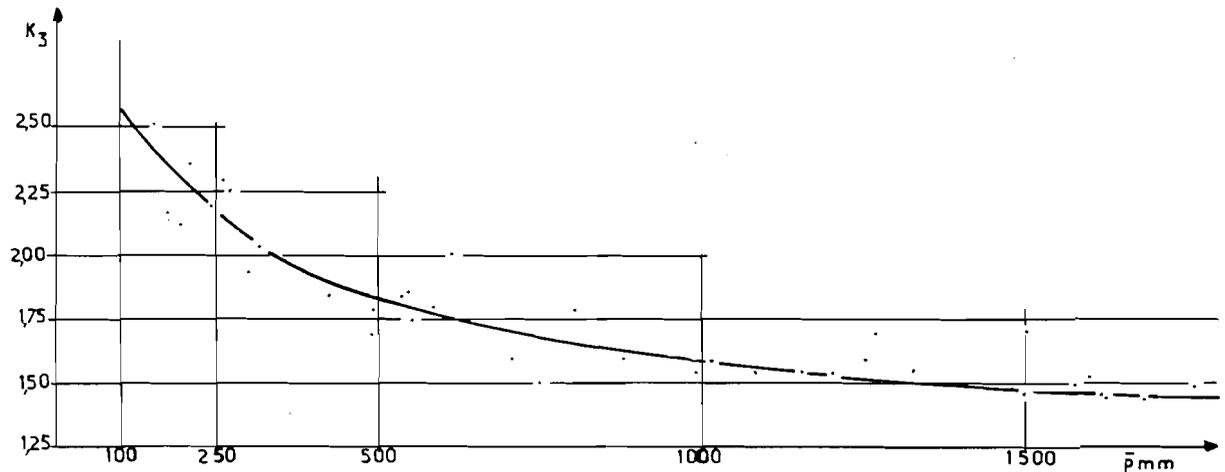


Figure 11. Relation entre le coefficient K3 et la pluviométrie moyenne annuelle \bar{P} (Bassin du Niger). (d'après Monographie Hydrologique du fleuve Niger)

Documentation Française (1975). Nous emprunterons à une de ces études (ALBERGEL, 1986) quelques conclusions sur les conséquences de la dernière sécheresse quant à l'évolution de quelques variables pluviométriques. A partir de l'analyse de la pluviométrie du Burkina Faso, cet auteur montre que :

- La période de sécheresse persistante depuis 1969 se singularise des autres sécheresses connues dans cette région (1913, 1939) par sa durée et son ampleur. Elle se traduit par :
 - une descente de presque deux degrés en latitude des isohyètes interannuelles de la décennie 1970-80,
 - une concentration exceptionnelle d'années sèches depuis 1970,
 - une très forte diminution du volume d'eau apporté par les précipitations journalières supérieures à 40 mm. Les variations de cette fraction de la pluviométrie expliquent à elles seules 50 % en moyenne de la variabilité de la pluviométrie annuelle.
- Si, sur l'ensemble du pays, le nombre de précipitations journalières supérieures au seuil de récurrence annuelle a diminué pendant la période 1969-83, ce n'est statistiquement pas vrai à l'échelle de chaque station.
- Les valeurs des pluviométries journalières extrêmes de la période 1969-83 ne se singularisent pas du reste des séries. Entre autre, l'estimation de la pluie journalière de récurrence décennale n'est pas affectée par la prise en compte des années de sécheresse.

Sur les petits bassins versants de la zone sahélienne, une des conséquences de la sécheresse est, paradoxalement, une diminution de l'infiltration et une augmentation du ruissellement, la chute de la pluviométrie étant largement compensée par une modification des états de surface (ALBERGEL, 1987a). La diminution du couvert herbacé, due à un régime hydrique des sols moins favorable à la croissance des plantes, entraîne le développement d'organisations pelliculaires de surface qui réduisent encore l'infiltration de l'eau. Cette imperméabilisation est renforcée par l'extension des zones cultivées, consécutive à la baisse de rendement des cultures pendant la sécheresse, qui se traduit par un accroissement des zones très érodées, imperméables, sur ces sols fragiles (ALBERGEL et VALENTIN, à paraître).

Les précipitations journalières

Dans toute la zone sahélienne, l'étude des averses peut être assimilée à celle de la pluviométrie journalière, les journées où se produisent plusieurs averses étant relativement rares. Au nord de l'isohyète 1000 mm, la forme de pluie la plus fréquente, et même quasi-exclusive, est le type "tornade" dont le hyétogramme* peut être schématisé de la façon suivante :

- une période préliminaire d'intensité moyenne (10 à 30 mm.h⁻¹) de courte durée
- le corps de la tornade à forte ou très forte intensité moyenne (40 à 100 mm.h⁻¹). La durée de cette période est courte : 5 à 20 minutes avec généralement un paroxysme de 5 à 10 mn où les intensités atteignent 150-200 mm.h⁻¹ ou plus.
- la traîne de la tornade, à faible intensité : 15 à 30 mm.h⁻¹ au début et très vite 10 puis 5 à 1 mm.h⁻¹. La traîne dure de 1/2 heure à 2 heures.

Ces tornades se produisent en général en fin d'après-midi et surtout la nuit.

Pluie au sol

La bague réceptrice des pluviomètres des réseaux météorologiques nationaux est placée, selon les normes de l'O.M.M., à 1 mètre au-dessus de la surface du sol (1,5 m pour les relevés anciens). La pluie simulée est, elle, mesurée au niveau du sol. Il importe donc de vérifier la cohérence et la compatibilité de ces deux types de mesure et ce d'autant plus que la pluviométrie qui intervient dans les phénomènes de ruissellement ou d'infiltration est, bien sûr, celle qui parvient au sol.

Une étude des rapports entre pluviométrie au sol et pluviométrie à 1 mètre a été menée récemment (CHEVALLIER et LAPETITE, 1987) sur 8 sites étagés entre 5° (Abidjan) et 17° de latitude nord (Agadez). Il ressort de cette étude que pour les basses latitudes, les deux mesures de la pluviométrie sont similaires, mais qu'à partir d'environ 9°N, la pluviométrie au sol est systématiquement supérieure à celle mesurée à 1 mètre, la différence s'accroissant du sud au nord. Il existe cependant toujours une très bonne corrélation entre pluie au sol et pluie à 1 m. Au niveau des pluviométries journalières, la liaison entre les deux valeurs est linéaire, de forme :

$$\text{Pluie au sol} = A \times \text{Pluie 1m} + B$$

Afin de comparer les valeurs observées aux différents postes, indépendamment du nombre d'observations et de leur situation géographique, les auteurs utilisent une variable X, appelée "écart" entre pluie au sol et pluie à 1 m, et calculée selon :

$$X = (A \times PJ + B) / PJ$$

où :

PJ = hauteur de la pluie journalière de fréquence annuelle

A et B = valeurs des constantes de la régression entre la pluie au sol et pluie à 1 m au poste considéré.

Ils montrent que cette variable est liée :

- à la latitude par une expression de type polynomial, (fig.12) :

$$X = 10,7 \cdot 10^{-6} \text{ Lat}^4 + 0,95$$

- à la pluie journalière de fréquence annuelle par une double relation linéaire (fig.13) :

$$X = - 0,026 PJ + 2,63 ; \text{ pour } PJ < 62 \text{ mm}$$

$$X = - 0,0007 PJ + 1,08 ; \text{ pour } PJ > 62 \text{ mm.}$$

Cette étude est encore trop partielle pour qu'on puisse utiliser ces relations, sans de grandes précautions, les variations entre pluie au sol et pluie à 1 m étant, de plus, largement conditionnées par l'environne-

ment du poste pluviométrique. Elle permet, cependant, d'attirer l'attention sur les risques de sous-estimation du volume d'eau réel apporté par les précipitations, lorsque l'on utilise les mesures classiques de pluviométrie. Cette sous-estimation peut être très importante, puisque à Agadez le rapport entre pluie au sol et pluie à 1 m est voisin de 2.

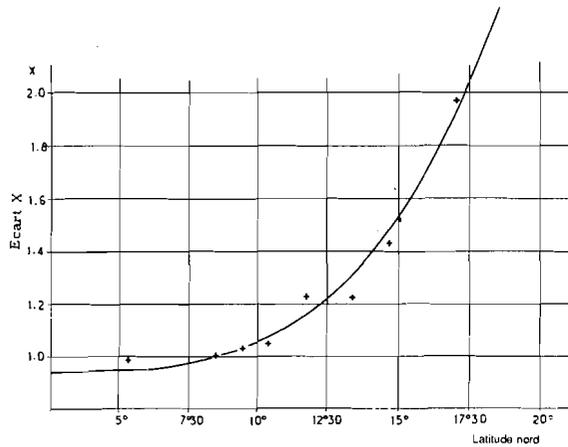


Figure 12.
Ecart pluie au sol - pluie à 1 m
en fonction de la latitude

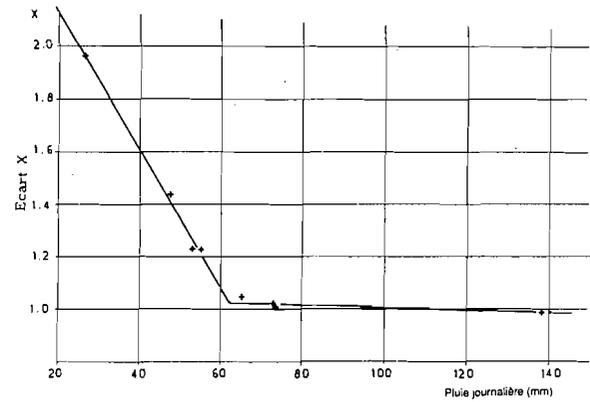
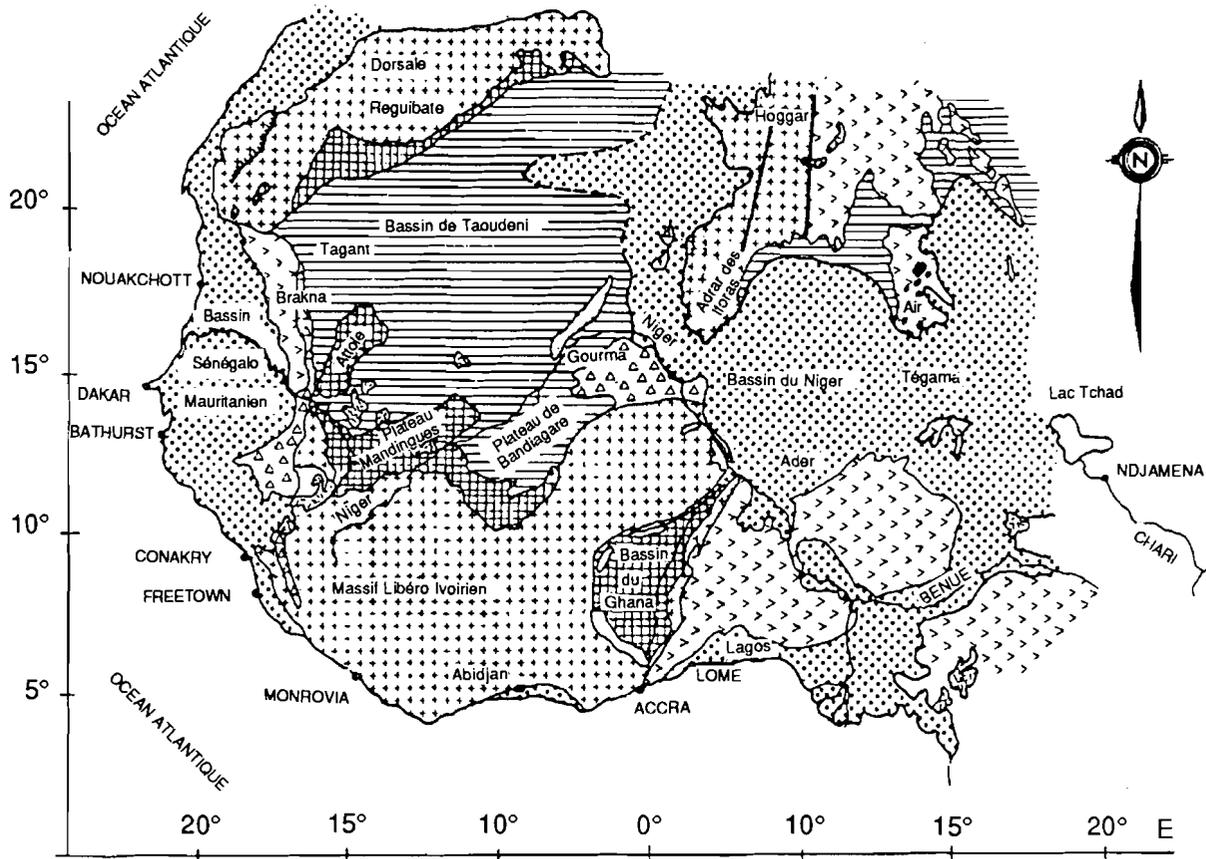


Figure 13.
Ecart pluie au sol - pluie à 1 m
en fonction de la pluie journalière de fréquence annuelle

LES GRANDS TRAIT DE LA GÉOLOGIE SAHÉLIENNE

On peut distinguer, pour la partie du Sahel concernée par cette étude, quatre grands ensembles géostructuraux (carte n° 4).

CARTE GÉOSTRUCTURALE SIMPLIFIÉE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST



-  SECONDAIRE ET TERTIAIRE
-  PALÉOZOÏQUE
-  PRÉCAMBRIEN SUPÉRIEUR PLISSÉ
-  PRÉCAMBRIEN SUPÉRIEUR DES PLATEFORMES ANCIENNES
-  PRÉCAMBRIEN RAJEUNI
-  PRÉCAMBRIEN PLISSÉ
-  VOLCANISME ACIDE
-  VOLCANISME INDIFFÉRENCIÉ

Carte n° 4.
Ensembles géostructuraux
(d'après A. FAURE MURET ; in UNESCO, 1971)



photo 16.
*Altération de granite en boules,
région de Déou, Burkina Faso.*



photo 17.
*Formation gréseuse tabulaire,
région de Hombori, Mali.*



photo 18.
*Grès ferrugineux, altérés en reg, de l'Ader Doutchi,
bassin versant de Kountkouzout, Niger.*

LE SOCLE OU CRATON OUEST-AFRICAÏN

Les formations cristallines (photos n° 16 et n° 134), métamorphiques ou volcano-sédimentaires attribuées au Précambrien inférieur et moyen ont une extension limitée. Cependant, le socle est bien représenté au Burkina Faso où il occupe plus des trois quarts du pays et au Niger occidental à l'ouest du fleuve. En outre, c'est sur ce substratum de roches généralement acides (granites alcalins à calco-alcalins, quartzites, schistes et micaschistes) que la liaison entre géologie et états de surface, par l'intermédiaire des sols, est la plus mal assurée. On peut trouver sur ces formations géologiques pratiquement tous les états de surface qui seront décrits ultérieurement. C'est pourquoi le principal de nos mesures a porté sur cette zone.

LE BASSIN DE TAOUDENI

C'est le plus vaste bassin d'Afrique occidentale, puisqu'il mesure 1000 à 1500 km du nord au sud, de la dorsale reguibate au massif libéro-ivoirien et de 1400 à 1750 km d'est en ouest depuis l'Adrar mauritanien jusqu'à l'Adrar des Iforas. On distingue dans ces formations sédimentaires, attribuées au Précambrien A (900 - 1100 Ma) et au Cambro-Ordovicien, trois séries :

- la série 1, généralement gréseuse avec cependant des calcaires à stromatolites du Précambrien supérieur,
- la série 2, discordante sur la première, débute par des tillites auxquelles succèdent des calcaires dolomitiques et des pélites alternant avec des grès,
- la série 3, attribuée au Paléozoïque et en majeure partie à l'Ordovicien. Elle est principalement détritique (grès, quartzites) et se poursuit jusqu'au Carbonifère.

Ce bassin, dans le domaine sahélien, couvre le sud-est de la Mauritanie, le centre et le sud-ouest du Mali (photo n° 17). Cette zone n'a fait l'objet que de reconnaissances, mais pas de mesures, les états de surface s'étant révélés similaires à ceux observés dans d'autres zones

LE BASSIN DU NIGER (OU BASSIN DE TAMESNA)

Limité par l'Adrar des Iforas à l'ouest et le massif de l'Aïr à l'est, la partie sahélienne de ce bassin inclut l'est du Mali, le nord du Nigéria et la plus grande partie du Niger. Cette vaste cuvette est remplie de séries paléozoïques (grès et argile) au nord et de dépôts secondaires (grès et argilites) et tertiaires (calcaires, marnes, schistes et grès du "Continent Terminal") au sud. Cette zone a été principalement étudiée au Niger (bassins de Kountkougout - photo n° 18, Galmi, Banigorou, Agassaghas).

LE BASSIN SÉNÉGALO-MAURITANIEN

Long de plus de 1000 km, il couvre la majeure partie du Sénégal et le sud ouest de la Mauritanie. La sédimentation marine débute au Jurassique supérieur et se poursuit jusqu'à l'Eocène supérieur. Ces formations marines sont presque totalement recouvertes par le "Continental Terminal" et les dépôts quaternaires, marins ou continentaux (photo n° 19). Cette zone comme la seconde n'a fait l'objet que de reconnaissances partielles des états de surface.



photo 19.
*Formation dunaire quaternaire recouvrant
le Continental Terminal, Ferlo, Sénégal.*

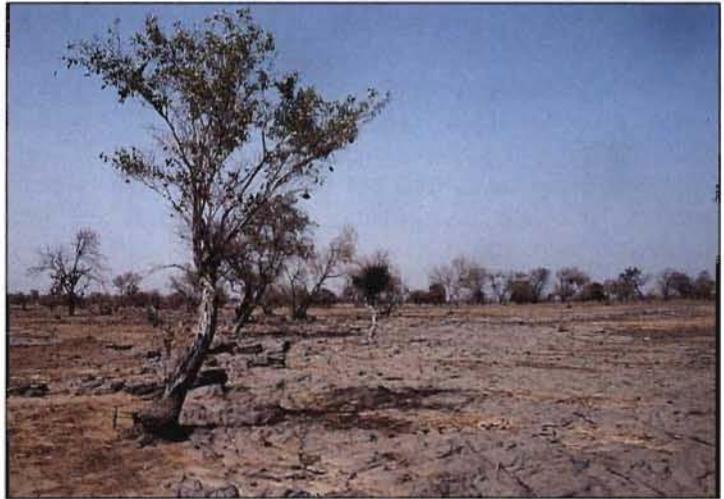


photo 20.
*Lithosol sur grès,
bassin versant de Koumbaka, Mali.*



photo 21.
*Régosol sur schistes,
bassin versant de Tin Adjar, Mali.
A noter : la schistosité verticale qui, en l'absence
de croûte, favoriserait l'infiltration,
et les vésicules qui, au contraire,
indiquent une très faible perméabilité.*

LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS

INTRODUCTION

La transposition des résultats acquis sur des petits bassins versants représentatifs, à des bassins non observés, requiert la caractérisation la plus complète possible des milieux concernés. A cet effet, les hydrologues de l'ORSTOM ont souvent demandé à leurs collègues pédologues d'identifier et, éventuellement de cartographier, les sols des bassins qu'ils étudiaient. C'est ainsi que parmi les 106 ensembles de bassins versants représentatifs ou expérimentaux recensés par DUBREUIL et al. (1972), 45 ont donné lieu à la rédaction de notes pédologiques, 37 à des cartes de sols. Ces tâches confiées aux pédologues ont-elles été couronnées de succès? Avec le recul du temps, il est permis d'en douter. A cet égard, il est significatif que lors du traitement des données acquises sur 241 bassins versants qui, pour la plupart, appartiennent aux ensembles déjà mentionnés, DUBREUIL, MORELL et SECHET (1975) ne prennent pas en compte les informations pédologiques contenues dans ces documents, et ne retiennent, pour leur classification, que des critères climatiques, botaniques et géologiques. Il semble bien, comme le signalent DUBREUIL et al. (1972), que l'approche alors adoptée par les pédologues soit, au moins en partie, responsable de cet échec. Elle reposait, en effet, sur :

- une **classification** fondée sur la morphologie et la genèse des sols (AUBERT, 1965 ; Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, C.P.C.S. 1967) et non sur leurs comportements hydrodynamiques.
- une **vision verticale et réductrice des sols**. La cartographie pédologique s'appuyait sur la définition d'unités de sols homogènes compris dans des limites abruptes et verticales. Or, toutes les études détaillées menées depuis dans la région ouest-africaine à longue saison sèche (BOCQUIER, 1971 ; BOULET, 1974 ; BRABANT et GAVAUD, 1985, ...) ont démontré l'existence de différenciations latérales, exprimées le plus souvent sous forme de gradients. En d'autres termes, les variations des sols et de leur fonctionnement hydrique doivent être considérées aussi bien le long des versants que verticalement.

Dans ce chapitre, nous résumerons d'abord les principaux concepts pédologiques actuels, nous présenterons ensuite les caractères majeurs des sols de la zone d'étude, nous évoquerons enfin leur distribution dans l'espace et leurs variations dans le temps. Nous reviendrons, en conclusion, sur les nouvelles perspectives

qu'apportent, dans le domaine hydrologique, les progrès accomplis depuis une vingtaine d'années dans la connaissance des sols des régions chaudes et de leur fonctionnement hydrique.

RAPPEL DE QUELQUES CONCEPTS PÉDOLOGIQUES

Les horizons, base de la description du sol

On désigne par "horizons" des couches parallèles à la surface qui constituent le sol tout en traduisant par leur différence son anisotropie verticale (AUBERT et BOULAIN, 1972). C'est l'unité de base de la description des sols. Ses limites avec les horizons voisins dans le sens vertical, horizontal ou oblique peuvent être abruptes ou très progressives (AFES, 1987). On distingue :

- Les horizons A : ils occupent la partie supérieure ou l'ensemble du profil du sol et se caractérisent par la présence de matière organique.
- Les horizons E (anciennement A₂) : ils subissent un appauvrissement en fer, en argile, en aluminium. C'est une zone d'éluviation, c'est-à-dire de départ de matériaux en solution ou en suspension, et d'accumulation relative en minéraux résistants, le quartz le plus souvent.
- Les horizons B : ils correspondent à un enrichissement absolu en substances provenant d'autres horizons, avec pour corollaire des teneurs en argile, en fer ou en humus plus élevées que dans les horizons A et C. Si les horizons A sus-jacents ont été érodés, l'horizon B affleure (photo. n° 96). Tel est notamment le cas de nombreuses carapaces ou cuirasses, reliques indurées de très anciens horizons B.
- Les horizons C : situés sous les horizons B (ou A, en l'absence de B), et différents de R, ils sont constitués de la roche en cours d'altération.
- Les horizons R : il s'agit de la roche inaltérée.

Le profil, base de l'inventaire typologique

A proprement parler, le profil ne correspond pas à un concept mais à un niveau de perception. Il s'agit de la coupe de sol, telle qu'elle apparaît sur la paroi d'une tranchée. Pour des raisons essentiellement pratiques, c'est ce mode de perception de la couverture pédologique, en *deux dimensions*, qui a été privilégié. Cette approche permet de distinguer, à une échelle élevée, celle du monde ou des continents, de grands types de

sols selon les conditions du milieu, plus particulièrement selon les grandes zones climatiques (loi de la *zonalité*).

La couverture pédologique

A des échelles plus fines, le sol apparaît comme un objet naturel, continu dans ses *trois dimensions*, que l'on désigne par le terme de couverture pédologique, partie superficielle de la lithosphère* transformée par des actions physiques, chimiques et biologiques (AFES, 1987). Au sein de cette couverture, les différenciations ne sont pas aléatoires mais s'ordonnent, au contraire, le long des versants. Cette couverture peut, en outre, subir des transformations au cours du temps (*quatrième dimension*).

LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS DE LA RÉGION SAHÉLIENNE

La classification française

Pour la présentation des caractères généraux des principaux types de sols de la région sahélienne, nous nous référons à la classification française de sols (C.P.C.S., 1967), pour deux raisons majeures :

- Au cours de la première décennie d'indépendance, les pédologues français ont largement contribué, en vue de leur mise en valeur, à la caractérisation et à la cartographie des sols des nouveaux Etats. La classification française reflète l'état des connaissances acquises lors de ces travaux. Du fait de cette expérience, cette classification s'avère mieux adaptée aux sols de cette zone que d'autres systèmes taxonomiques établis ailleurs : elle a introduit, par exemple, le type de sol "ferrugineux tropical lessivé" (cf. définition *infra*) qui, particulier à cette région, demeure sans équivalent dans les autres classifications.
- C'est sur cette classification que se sont appuyés la plupart des travaux cartographiques de cette zone, notamment les grandes synthèses par région ou pays :
 - Burkina Faso : BOULET et al. (1970), BOULET (1976)
 - Niger : Niger central : BOCQUIER, GAVAUD et BOULET (1964), Niger oriental : BOCQUIER et GAVAUD ; (1964), Niger occidental : GAVAUD (1966), Niger méridional : GAVAUD (1975), et (1977) ;
 - Nord Cameroun : BRABANT et GAVAUD (1985),
 - Tchad : PIAS (1970).

Les sols minéraux bruts et les sols peu évolués

Les sols minéraux bruts : l'horizon A, à peine différencié "(A)" recouvre un horizon C ou R. On distingue :

- les lithosols, affleurements de roche inaltérée dure (photo n° 20),
 - les régosols, (photo n° 21), pénétrables par les racines.
- Les sols peu évolués : à profil AC, peu profonds (<50cm).

Les sols bruns subarides

Ils se caractérisent par la pénétration de la matière organique (bien humifiée) dans le profil sur une épaisseur d'au moins 30 à 40 cm. Ils présentent une faible différenciation des horizons, une texture très sableuse et une forte porosité. Leur degré d'évolution dépend de leur âge et donc généralement de celui de la dune sur laquelle ils se sont développés. Selon leur couleur, on distingue les sols bruns subarides modaux et les sols brun-rouge subarides.

Les sols ferrugineux tropicaux

On en distingue trois grands types :

- Peu lessivés sur sables éoliens : le profil est plus différencié que celui des sols précédents.
- Lessivés ou appauvris : il existe un contraste assez fort, de couleur et de texture entre les horizons A ou E (sableux, gris ou blanchis) et les horizons B d'accumulation de fer et d'argile, souvent de couleur ocre à rouge, et contenant fréquemment des concrétions ferrugineuses.
- Ferrugineux tropicaux remaniés : d'épaisseur limitée, ils présentent un taux élevé de gravillons ferrugineux.

Parfois, quelques reliques de sols ferrallitiques se localisent à l'amont des toposéquences.

Les vertisols, les sols bruns eutrophes et les sols subarides vertiques

Ces sols sont toujours plus argileux que les sols précédents et contiennent des argiles gonflantes.

- Les vertisols : ils se caractérisent par une forte capacité de gonflement du matériau constitutif (au moins 35% d'argile), donnant naissance à une fissuration très marquée et à une structure prismatique en profondeur. Ils présentent parfois un microrelief particulier "gilgai" (photos n° 50, n° 67).
- Les sols bruns eutrophes : (photo n° 51), il s'agit de sols de couleur brune, à complexe d'échange saturé, et donc riches en éléments fertilisants. Ils présentent une structure bien marquée. On les distingue des vertisols par cette structure plus fine, et par l'absence ou la faible importance des phénomènes de gonflement.
- Les sols bruns subarides vertiques : ils s'apparentent aux sols bruns eutrophes mais ils appartiennent à

des régions plus sèches ; ils s'en différencient par une moindre épaisseur de l'horizon A. Leurs horizons profonds présentent une certaine analogie avec les vertisols.

Les sols salsodiques

Ils se définissent :

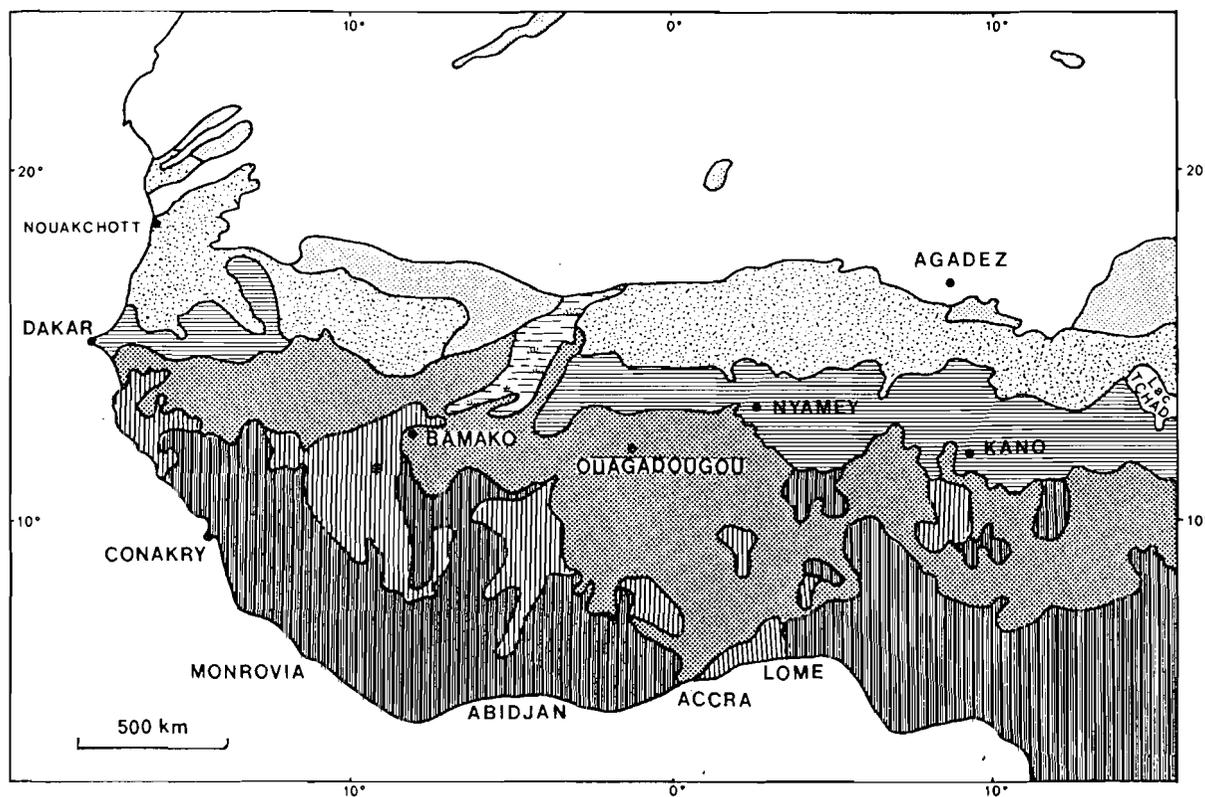
- Soit par la présence de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates,... de sodium ou/et de magnésium) qui se manifeste par une conductivité d'extrait de pâte saturée (test de laboratoire) supérieure à 7 mmhos.cm⁻¹ à 25°C.
- Soit par la présence de sodium ou/et de magnésium échangeables (Na > 10% de la capacité d'échange).

Ils correspondent sur les cartes aux :

- solonetz : ce sol se caractérise par la présence d'horizon A sableux et d'un horizon B, très compact, en colonnes (columnaire).
- solonetz solodisés : à la base de l'horizon A, sableux souvent plus épais que dans le cas précédent, on trouve un horizon E blanchi, très sableux. Comme pour les solonetz, le sommet des colonnes sous-jacentes présente une porosité vésiculaire.
- sols salins : ils se caractérisent par une teneur très élevée en sels, une texture généralement argileuse et, parfois, la présence d'efflorescences salines en surface.

Les sols hydromorphes

Leurs caractères et leur évolution sont déterminés par un excès d'eau. On les reconnaît à la présence de taches



	Sols minéraux bruts des déserts		Sols ferrugineux tropicaux lessivés
	Sols peu évolués subdésertiques		Association de sols ferrugineux tropicaux lessivés et de sols ferrallitiques
	Sols isohumiques (sols bruns subarides; sols brun-rouge subaride)		Sols ferrallitiques faiblement et moyennement désaturés
	Sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés		Sols hydromorphes

Carte n° 5
 Carte des sols de l'Afrique de l'Ouest
 (d'après Boulet et al. 1971, in Atlas International de l'Afrique de l'ouest)

de couleur rouille dans le profil (pseudogley - photo. n° 105) ou d'une teinte bleutée ou verdâtre (gley).

Tous ces sols ont été testés, à l'exception des sols développés sur les dunes vives, les lithosols, les vertisols et les sols salins (cf. chapitre 15).

Nouvelles perspectives taxonomiques :

De nombreuses réunions internationales ont tenté d'établir des corrélations entre les différents systèmes taxonomiques : légende de la carte mondiale des sols (FAO-UNESCO, 1975), "Soil taxonomy" (USDA, 1975), ... Elles n'ont pas réussi, pour autant, à définir des correspondances sûres. Un consensus est néanmoins en train de se dégager autour de la définition de grands types de sols qui servirait de base de référence à la classification mondiale des sols (International Reference Base for Soil Classification).

Parallèlement, la communauté pédologique francophone a, depuis quelque temps, entamé une série de travaux visant à l'élaboration d'un Référentiel Pédologique Français qui devrait voir le jour avant la fin de cette décennie (AFES, 1987).

DISTRIBUTION DANS L'ESPACE ET ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

Distribution dans l'espace :

A l'échelle continentale

Comme nous l'avons déjà signalé, les grands types de sols se répartissent en fonction des zones climatiques. De fait, il est possible de distinguer du nord au sud de notre zone d'étude (carte n° 5) :

- les sols peu évolués subdésertiques,
- les sols développés sur des couvertures sableuses : sols bruns subarides modaux et sols brun-rouge subarides,

- les sols ferrugineux tropicaux, plus ou moins lessivés selon la latitude.

A cette succession, s'ajoutent les sols hydromorphes, salsodiques et vertiques (sols intrazonaux).

Aux échelles plus fines

Pour étudier la distribution des sols à l'échelle du paysage, il s'avère très intéressant de s'appuyer sur la connaissance du relief et de son évolution (géomorphologie). C'est ainsi que l'on s'efforce d'associer, dans la même unité cartographique, une portion de la couverture pédologique à une facette paysagique, facilement repérable sur photographies aériennes. Dans l'exemple que nous présentons (fig.14, photo. n° 22), les sols bruns eutrophes correspondent, au moins en première approximation, à la dépression autour de la colline de roches vertes (à droite de la photo). Seule l'évolution du relief a permis, en effet, le développement de ces sols : ce n'est qu'après le démantèlement de la cuirasse autour de la colline et le creusement de la dépression périphérique par l'érosion que les roches basiques ont pu être soumises de nouveau à une altération active.

A l'échelle des versants, les variations de la couverture pédologique s'ordonnent selon la pente de la séquence topographique ("*toposéquence*", figure 15, voir page suivante). Pour une région donnée, on peut ainsi repérer un nombre limité de toposéquences, le long desquelles la succession latérale des volumes pédologiques (horizons) reste toujours la même. GAVAUD (1971), lors d'un premier inventaire des principales toposéquences de la zone tropicale à longue saison sèche, a identifié, par exemple, 11 grands types de couvertures pédologiques. Pour le Nord-Cameroun, la combinaison de 24 volumes pédologiques caractéristiques permet de définir 12 grands types de couvertures pédologiques (BRABANT et GAVAUD, 1985) dont 9 s'organisent en toposéquences.

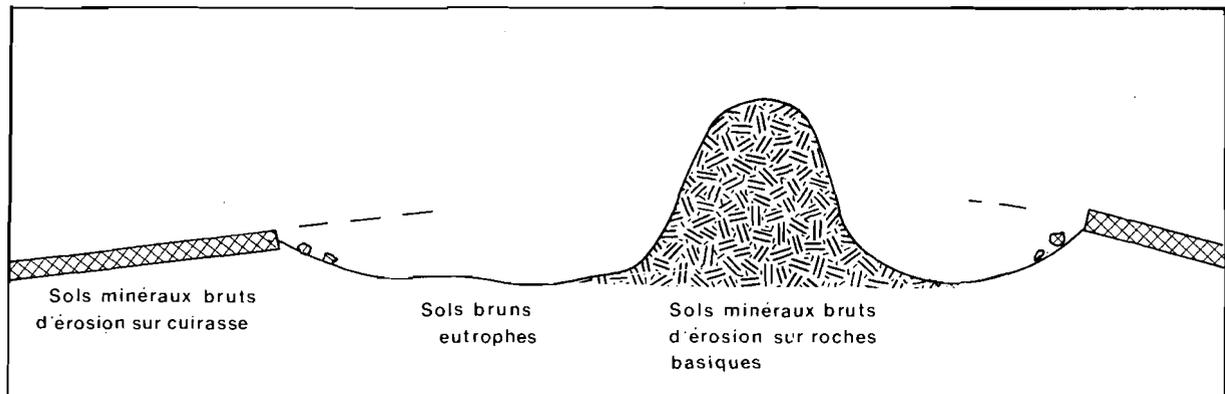


Figure 14.

Schéma de distribution des sols dans une dépression périphérique

Evolution dans le temps

Cette succession ordonnée le long des toposéquences ne résulte pas du hasard mais de l'histoire. Or, pour les sols de la région ouest-africaine, cette histoire est :

- longue puisqu'elle couvre plusieurs centaines de milliers d'années,
- mouvementée en raison des très nombreuses variations climatiques.

A l'échelle du Sahel, les couvertures pédologiques n'ont donc pas toutes le même âge (GAUVAUD, BOULET et LEVEQUE, 1974). Les plus anciennes occupent les positions topographiques les plus élevées : ce sont les hautes cuirasses ferrugineuses. Viennent ensuite les sols des surfaces d'aplanissement (glacis tropicaux et dépressions plates) ; sans armature cuirassée ancienne, ils sont sensibles aux conditions climatiques actuelles. Enfin, les sols les plus jeunes se développent sur les accumulations éoliennes récentes (dunes fixées) et subactuelles (dunes vives).

Dans les conditions actuelles, les sols formés sous des climats plus humides, subissent des transformations internes qui progressent latéralement d'aval en amont (BOCQUIER, 1971 ; BOULET, 1974). Au niveau de la toposéquence, ces déséquilibres se traduisent, par exemple, par l'existence de fronts d'éluviation (départ de l'argile) à l'amont et d'illuviation (accumulation absolue) à l'aval. L'étude de toposéquences réparties selon un gradient climatique révèle, en outre, que pour un même système de transformation, la part respective

de ses différentes composantes varie en fonction du degré d'évolution (fig.16). A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, BOULET (1987) distingue ainsi les grandes zones d'équilibre et de déséquilibre des couvertures pédologiques kaoliniques (argile peu gonflante) et montmorillonitiques (argile gonflante), (fig.17)

Comme l'a montré CHAUVEL (1977), cette dynamique évolutive se trouve accélérée par l'intervention de l'homme qui, par les défrichements et le travail du sol, modifie les conditions pédohydriques, et donc le pédoclimat.

LA NOUVELLE APPROCHE PÉDOLOGIQUE, RÉPONSE AUX BESOINS HYDROLOGIQUES

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'approche pédologique des années soixante n'a pas répondu à l'attente des hydrologues. Pour une part, cet échec doit être imputé à la demande hydrologique elle-même. A cette époque, la priorité allait à l'élaboration d'une typologie de bassins versants, fondée sur des critères simples : paramètres physiques (indices de compacité, de pente, ...), grand type de couvert végétal, nature géologique du substrat, et implicitement, grand type de sol. Il était alors exclu de prendre en compte la complexité des bassins versants : ceux-ci devaient être traités comme des entités homogènes, à des fins statistiques. Par là-même, les problèmes n'étaient pas posés à la même échelle : d'une part celle du profil, d'autre part celle du bassin versant.

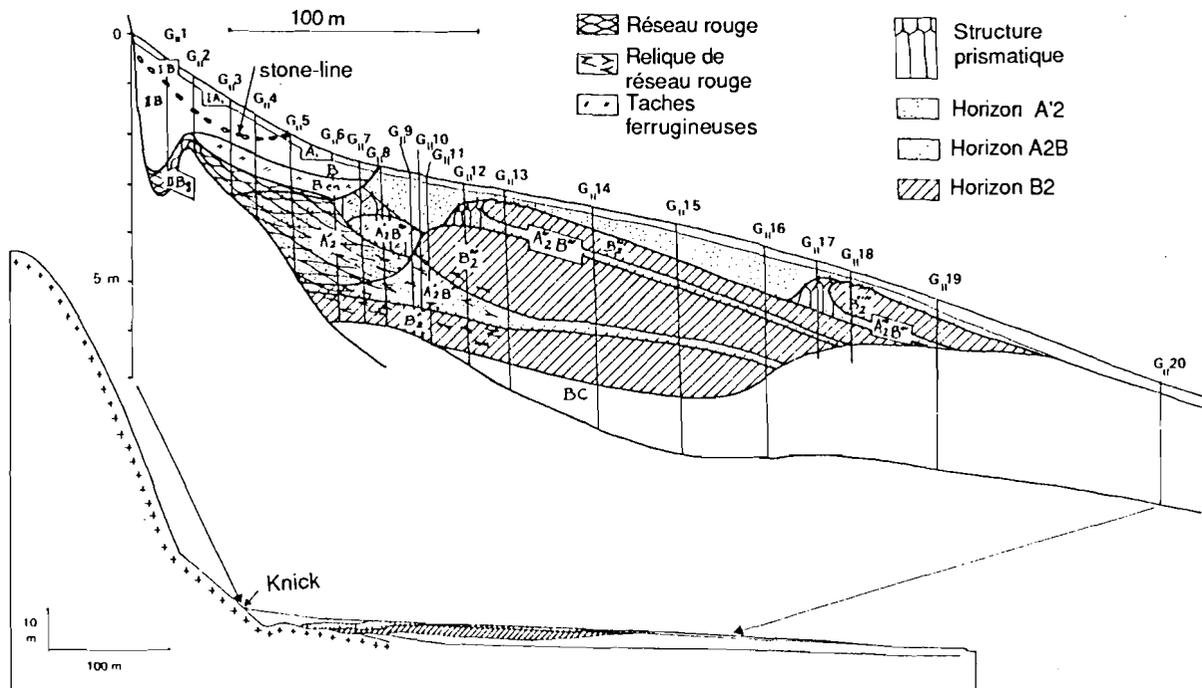


Figure 15.

Exemple de toposéquence au BURKINA FASO (GARANGO II). D'après BOULET (1974).

photo 22.
*Région de Koumbri, dépression annulaire,
 distribution des sols dans le paysage
 (cf. chapitre 7), Burkina Faso.*

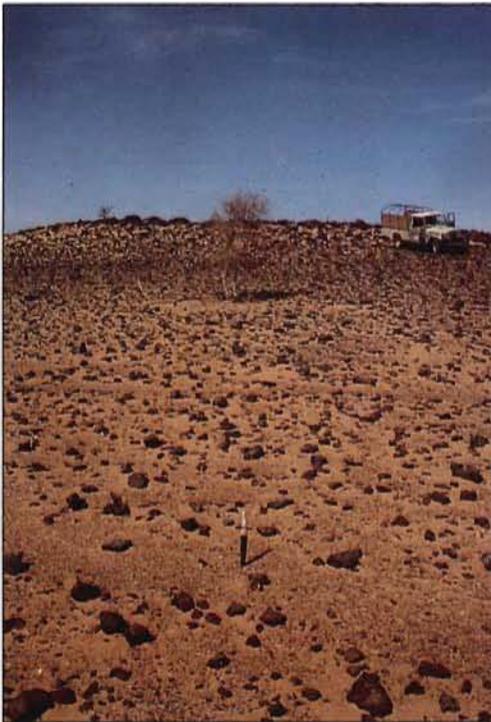


photo 23.
*Exemple de "végétation" du secteur sahélo-saharien,
 Maerua crassifolia Forsk, bassin versant de Tin Adjar, Mali*



photo 24.
*Exemple de végétation du secteur sahélien typique,
 Calotropis procera (Ait) Ait. F., avril,
 Ader Doutchi, Niger.
 A noter : les micronides d'éolisation,
 témoins d'une déflation marquée.*

Depuis, les progrès réalisés de part et d'autre, donnent plus de cohérence aux deux démarches :

- les pédologues, nous l'avons vu, ont peu à peu délaissé l'approche typologique à partir de grands profils caractéristiques, utile pour les grands inventaires, mais peu adaptée aux études détaillées. Ils privilégient désormais l'étude en trois dimensions des volumes qui constituent la couverture pédologique. Ce faisant, ils ont montré que, dans les zones aride et semi-aride ouest-africaines, certaines différenciations pédologiques sont particulièrement liées au fonctionnement hydrique (PEDRO et al., 1987) :
- la surface du sol : ses caractères déterminent la part de l'eau qui s'infiltre et celle qui ruisselle,
- les horizons superficiels : leur appauvrissement résulte de transferts latéraux d'eau, de fer et d'argile,
- le niveau plus profond, à la limite des horizons B et C : les exportations latérales d'argiles et leur accumulation en aval sont tributaires d'une nappe fluctuante et temporaire.

En sorte que, les analyses détaillées de la couverture pédologique ont conduit les pédologues à considérer l'hydrodynamique tant comme facteur que comme conséquence de l'autodéveloppement des systèmes de transformations pédologiques.

- Les hydrologues, enclins naguère à privilégier l'approche statistique des phénomènes de ruissellement, s'orientent désormais vers une approche plus déterministe. Comprendre les processus physiques pour mieux les prévoir implique tout naturellement la prise en compte des flux d'eau au sein de la couverture pédologique. D'où la mise en œuvre d'études expérimentales à des échelles inférieures à celle du bassin versant représentatif : parcelles, microbassins.

Au total, que reste-t-il des obstacles d'il y a vingt ans qui vouaient à l'échec toute coopération hydro-pédologique ? Assurément bien peu de choses : ils partagent de nos jours, les mêmes objectifs, les mêmes méthodes, les mêmes échelles d'analyse.

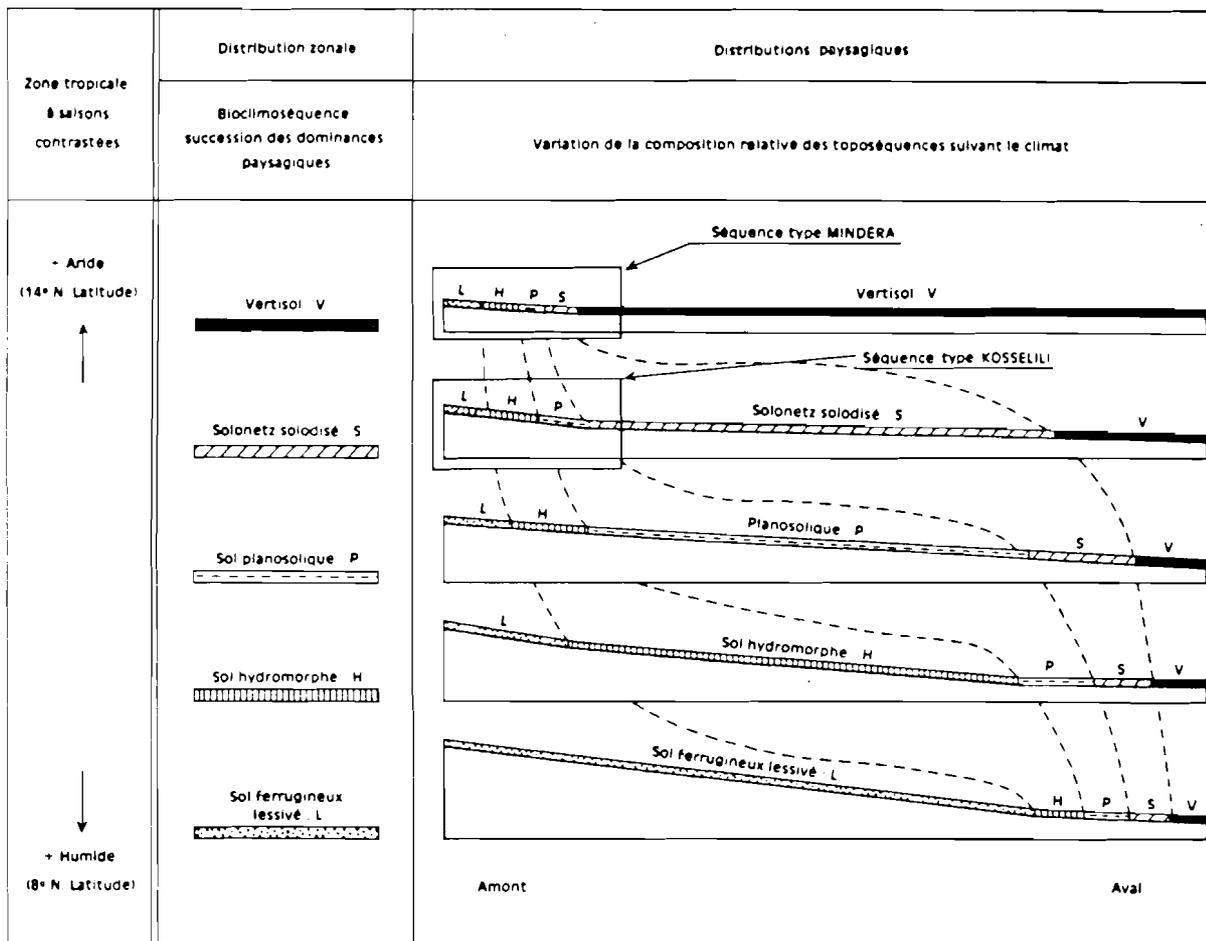


Figure 16.

Variation des composantes pédologiques d'un même système de transformation en fonction des conditions bioclimatiques. Cas de l'Afrique de l'Ouest. D'après BOCQUIER (1971).



photo 25.
Savane arbustive du secteur sahélien typique,
décembre, Ferlo, Sénégal.



photo 26.
Savane arborée du secteur sahélien typique,
sur dune ancienne, décembre,
région de la mare d'Oursi, Burkina Faso.

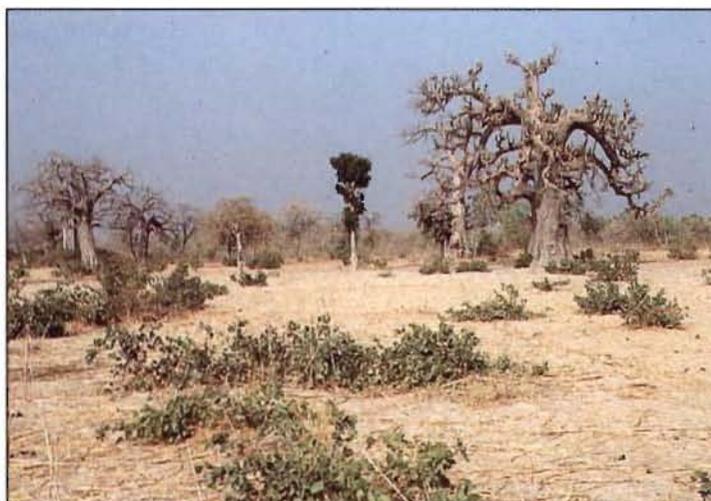


photo 27.
Champ de mil en secteur sahélo-soudanien,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : le jeune recrù de *Piliostigma reticulatum*
DC.) Hochst, assez typique des jachères,
et dans le fond *Adansonia digitata* L. (baobab).

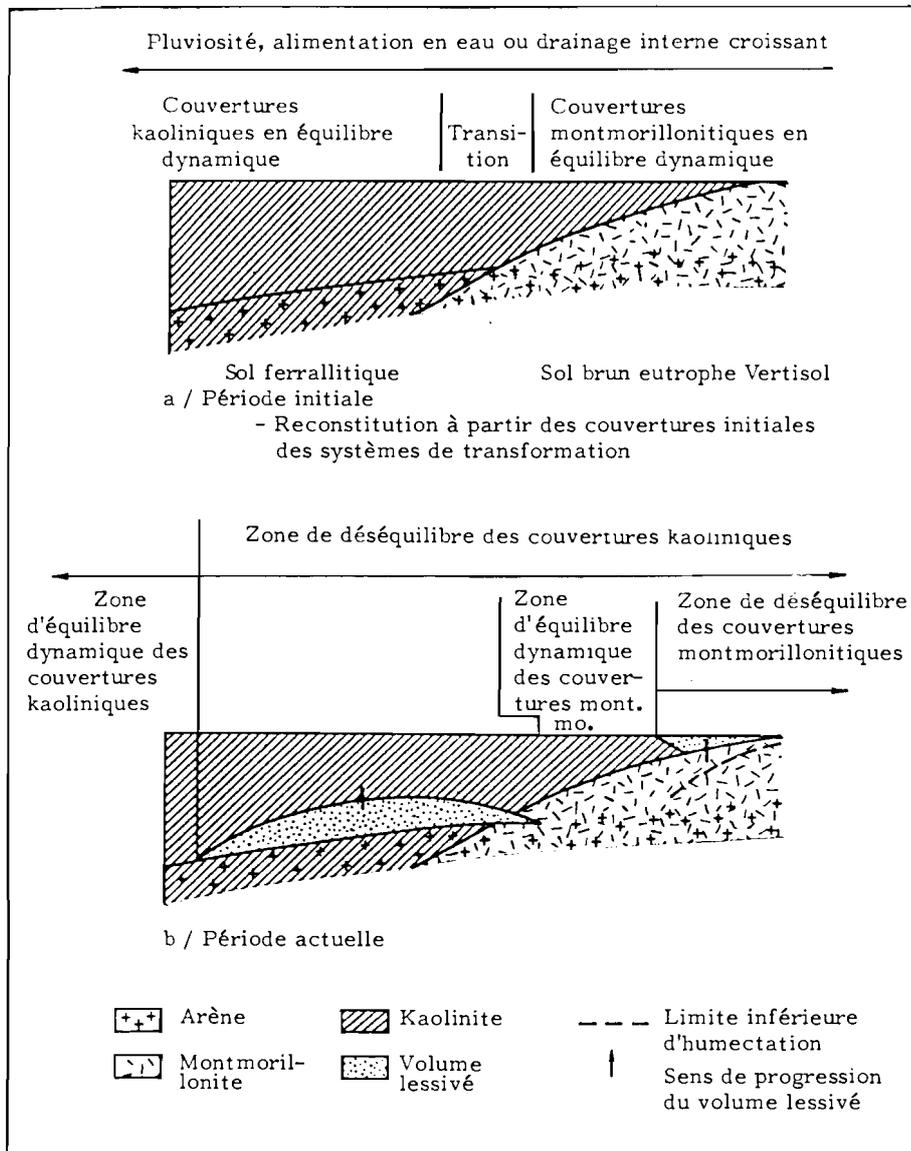


Figure 17.

Développement de transformation aux dépens des couvertures pédologiques initiales dans l'Afrique de l'Ouest (d'après BOULET, inédit)



photo. 28.
*Champ de mil en secteur sahélo-soudanien,
région de Mopti, Mali.
A noter : les nombreux Acacia albida Del.*



photo 29.
*Champ de mil en secteur soudano-sahélien,
cultivé en billons, région de Ségou, Mali.
A noter : l'abondance
de Borassus aethiopum Mart (rônier).*

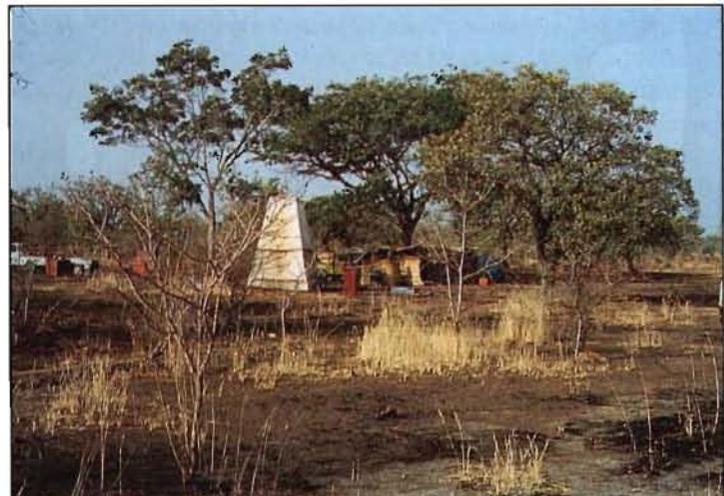


photo 30.
*Exemple de végétation nord-soudanienne,
bassin versant du Kuo, Burkina Faso.
A noter : les traces de brûlis
qui a partiellement détruit la végétation herbacée.*

LE COUVERT HERBACÉ

INTRODUCTION

De très nombreuses études ont montré l'influence déterminante du couvert herbacé sur l'infiltration en zone sahélienne (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; COLLINET et VALENTIN, 1979 ; CHEVALLIER et VALENTIN, 1984 ; PONTANIER et al. 1986 ; THEBE, 1987 ; ALBERGEL, 1987b). Il est clair que le couvert arboré joue aussi un rôle important, mais qui est perceptible à une autre échelle que celle des mesures effectuées sous pluies simulées. Nous l'aborderons dans la dernière partie, lors de l'exposé des unités cartographiques à l'échelle des bassins versants. Nous nous limiterons ici à la présentation succincte des grands types de couverts herbacés sahéliens.

LES GRANDS TYPES DE COUVERTS HERBACÉS DE LA ZONE SAHÉLIENNE

Comme nous le verrons par la suite, c'est davantage la structure du couvert herbacé (pourcentage de couvert,...) et non sa composition floristique qui intervient sur les phénomènes d'infiltration. Toutefois, quelques rudiments de botanique s'avèrent nécessaires lors d'une étude plus écologique du milieu, notamment du suivi d'une dynamique évolutive : une dégradation de l'environnement se traduit, par exemple, par la disparition d'espèces pérennes au profit d'espèces annuelles. A cet égard, des modifications dans la composition floristique du couvert herbacé, particulièrement sensible à de faibles variations du pédoclimat, peuvent prélude à des ruptures d'équilibre plus spectaculaires : dénudation totale du sol, apparition d'une ravine,...Voilà pourquoi, il nous paraît important de mentionner l'essentiel en ce domaine. Pour cela, nous nous référons aux travaux des agrostologues qui étudient les pâturages tropicaux.

Dans notre zone d'étude, BOUDET (1977, 1984) distingue, 4 grands secteurs : sahélo-saharien, sahélien, sahélo-soudanien, soudano-sahélien :

secteur sahélo-saharien :
pluviométrie comprise entre 100 mm et 200 mm.
(photo n° 23)

Les herbacées pérennes, comme *Panicum turgidum*, colonisent les zones de ruissellement et les points bas où elles forment des touffes éparées, souvent victimes du surpâturage ; le peuplement des annuelles, *Aristida*

mutabilis et *Cenchrus biflorus* (le fameux "cram-cram") sur sols sableux, *Schoenfeldia gracilis* sur les sols plus limoneux et compacts, dépend étroitement de la pluviométrie de l'année. Lorsque celle-ci est suffisante, les herbacées couvrent l'ensemble de la surface, formant ainsi de véritables prairies, éphémères, il est vrai.

secteur sahélien typique :
pluviométrie comprise entre 200 mm et 400 mm.
(photos n° 24, n° 25 et n° 26)

Déjà peu abondantes avant la période de sécheresse qui a débuté en 1969, les herbacées pérennes comme *Andropogon gayanus*, qui se localisaient dans les petites dépressions, ont, de nos jours, presque toutes disparu. La prédominance des annuelles est donc quasi-totale. Aux espèces précédentes s'ajoutent *Panicum laetum* et *Zornia glochidiata*, petite Fabacée* très appréciée du bétail. Sur les sols sableux, le surpâturage provoque la disparition de *Aristida mutabilis* et l'expansion de *Cenchrus biflorus*. Dans les zones plus argileuses, il entraîne la dénudation totale du sol.

secteur sahélo-soudanien :
pluviométrie comprise entre 400 mm et 600 mm.
(photos n° 27 et n° 28)

La Poacée* pérenne *Andropogon gayanus* occupe une place non négligeable tandis que certaines annuelles deviennent indifférentes à la texture du sol : tel est le cas notamment de *Schoenfeldia gracilis* et de *Zornia glochidiata* qui, en climat plus sec, recherchent les sols assez limoneux ou argileux. Une surexploitation du milieu conduit à l'élimination des Poacées annuelles au profit de *Zornia glochidiata* (précisons qu'officiellement le terme de Poacées doit être préféré à celui de graminées).

secteur soudano-sahélien :
pluviométrie comprise entre 600 et 800 mm.
(photo n° 29)

Les Poacées pérennes comme *Andropogon gayanus*, deviennent abondantes sur les sols profonds et drainants mais restent dominées par les annuelles dont *Pennisetum pedicellatum* qui pousse à l'ombre des arbres, bien plus nombreux que dans les secteurs précédents (photo n° 30). Dans cette zone très cultivée, les herbacées, même pérennes, résistent assez bien à l'utilisation des sols.



photo 31.
Turricules de vers de terre,
Parc National de la Comoé, Côte d'Ivoire



photo 32.
Termitières champignons
(nid de Cubitermes) sur bowal,
région de Dion, Mali.

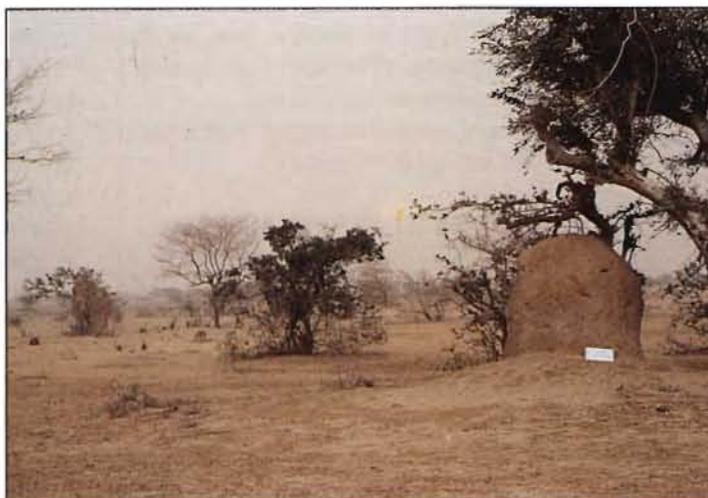


photo 33.
Termitière en "donjon",
bassin versant de Gagara, Burkina Faso.
A noter que ces termitières se localisent
préférentiellement dans les zones d'endoréisme.

LA MÉSOFAUNE

INTRODUCTION

Pas plus que nous ne l'avons fait pour les autres composantes de l'environnement, nous n'entrerons ici dans le détail des relations existant entre la faune et le sol. C'est le domaine des pédobiologistes et il existe des ouvrages remarquablement bien documentés sur la question (BACHELIER, 1978). Se limiter à la seule surface du sol serait aborder un domaine trop vaste encore ; il faudrait en effet la considérer selon des points de vues qui nous éloigneraient trop de notre sujet : celui, par exemple, essentiel dans cette région, de la protection des cultures. Certaines surfaces ne sont-elles pas plus propices à la pullulation des criquets (AUDRY et ROSSETTI, 1962) ou à celle des rats (HUBERT, LEPRUN et POULET, 1977) ? Nous nous bornerons à évoquer la distribution climatique des vers de terre et des termites au sein de la zone étudiée.

LES VERS DE TERRE

Les vers de terre abondent dans les savanes (photo n° 31) où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1000 mm. En deçà de cette limite pluviométrique, leur habitat se restreint à une bande étroite le long des cours d'eau, où le sol conserve une certaine humidité. Selon MENAUT et al. (1985), ils disparaissent quand la pluviométrie est inférieure à 800 mm. Bien que leur activité ne se manifeste que dans les régions les plus arrosées de notre zone d'étude, bassins de Boulsa, de Binnde-Kazanga et du Kuo (ce qui mettrait la limite plus à 700 mm qu'à 800 mm), nous lui accordons une grande importance pour deux raisons :

- La présence des rejets de vers en surface du sol permet d'introduire dans notre typologie une limite bioclimatique (cf. 4^{ème} partie), fondée, non sur des données météorologiques, très fluctuantes ces dernières années, mais sur des observations de terrain.
- Les vers favorisent considérablement l'infiltration de l'eau dans les sols (cf. 3^{ème} partie).

LES TERMITES ET LES FOURMIS

Contrairement aux vers, les termites résistent assez bien à la sécheresse. Ils peuvent en effet creuser des galeries jusqu'à 40-55 m de profondeur pour atteindre une nappe comme l'ont montré LEPAGE, MOREL et RESPLENDINO (1974), dans le Ferlo, au nord du Sénégal. Parfois, ils se ménagent des réservoirs d'eau sous leur nid (LEPRUN, 1976), en sorte qu'au Burkina

Faso, certains hydrogéologues s'appuient sur la reconnaissance des termitières et des plantes hygrophyles pour orienter leur prospection des eaux souterraines (SAVADOGO, 1987). Dans les petites dépressions du Ferlo, une espèce de termites, *Bellicositermes bellicosus*, consomme à elle seule près de 50% de l'herbe produite. Dans le cas d'une sécheresse prolongée, ils se nourrissent davantage de bois mort que de litière herbacée (LEPAGE, 1974), manifestant de remarquables facultés d'adaptation.

Au cours de nos travaux, nous avons décrit des placages de termites (photo n° 70) et des termitières dans l'ensemble de la région d'étude. En quoi l'activité des termites entre-t-elle dans le cadre de notre étude ? Pour trois raisons majeures :

- D'abord, les termites jouent un rôle important sur l'infiltration de l'eau, tantôt en l'augmentant, par leur activité de récolte, tantôt en la réduisant, par l'édification de nids très peu perméables (cf. 3^{ème} partie).
- Ensuite, la forme des nids épigés étant caractéristique, la reconnaissance sur le terrain de ces termitières permet, le cas échéant, de les relier à un type de surface. :
 - forme en champignon pour *Cubitermes*. Souvent indicatrices d'hydromorphie à faible profondeur, ces termitières peuvent être très abondantes sur les bowé, c'est-à-dire sur les plateaux cuirassés présentant un engorgement temporaire (photo n° 32) lorsque la pluviométrie est suffisante (supérieure à 750 mm).
 - forme en dôme, "cathédrale", ou "donjon", pour *Bellicositermes* et *Macrotermes* (photo n° 33). Une fois abandonnés, ces nids s'érodent, en laissant un cône plus ou moins émoussé (photo n° 34), dont la surface, très dure, sera assimilée par la suite à celle d'une croûte d'érosion (photo n° 165).
- Enfin, les nids les plus grands se repèrent très aisément sur les photographies aériennes (SOMBROEK et ZONNEVELD, 1971 ; VALENTIN, 1985b) qu'ils ponctuent de petites taches circulaires blanches (photo n° 35). Lorsque, au préalable, une étroite relation a pu être établie entre leur présence et d'autres caractéristiques de surface, la définition de leur aire de distribution facilite le tracé des limites de l'unité cartographique correspondante.

Les fourmilières aussi peuvent revêtir une importance à l'égard de l'infiltration. Elles se signalent par l'existence de remontées de terre, souvent en forme d'entonnoir de petite taille, édifié autour du pore ouvert en surface (photo n° 36). Par souci de simplification, nous assimilerons par la suite ces fourmilières aux placages de récolte des termites.



photo 34.
*Termitière cathédrale érodée par le vent et la pluie,
 bassin versant de Tin Adjar, Mali.*

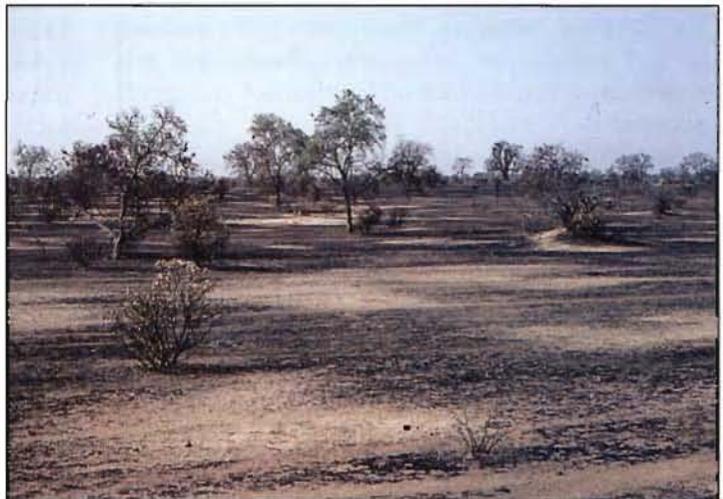


photo 35.
*Taches circulaires dues aux différents
 stades d'érosion de termitières "cathédrales",
 Tatki, Ferlo, Sénégal.
 A noter : l'effet du brûlis
 sur la végétation herbacée.*



photo 36.
*Fourmières,
 bassin versant de Banigorou, Niger.*

LE TRAVAIL DU SOL

INTRODUCTION

Notre zone d'étude recouvre deux grandes régions :

- La zone aride : sous une pluviométrie annuelle inférieure à 300 mm, concentrée en deux mois, la production agricole est impossible, ou très marginale. D'où la prédominance quasi-exclusive des systèmes de production pastoraux ou sylvo-pastoraux.
- La zone semi-aride : les plantes à cycle court peuvent arriver à maturité pendant la saison des pluies de trois mois, sous une pluviométrie supérieure à 300 mm. Cette zone correspond à des systèmes de production agro-pastoraux ou agro-sylvo-pastoraux.

A ces cultures pluviales, s'ajoutent les cultures de décrue et les cultures irriguées. Il faudrait distinguer aussi celles qui font appel à la traction animale ou à l'utilisation de tracteurs. Nous avons testé, au cours de nos travaux, les techniques culturales les plus répandues, à savoir celles de l'agriculture pluviale et manuelle.

Nous n'entrerons pas dans la complexité des systèmes de culture, nous limitant au travail du sol. Qui plus est, l'échelle des mesures, le mètre carré, interdit toute prise en compte de l'effet du parcellaire ou de travaux antiérosifs sur le ruissellement. Par ailleurs, les mesures sous pluies simulées correspondent à un état de surface donné à un instant donné. Or, ce dernier évolue selon l'itinéraire technique adopté : préparation du sol, semis, sarclages, récolte,... Comme nous tenterons de le montrer en dernière partie, la somme des données acquises concernant les relations "état de surface - infiltration", permet de reconstituer, dans une certaine mesure, l'ensemble de la dynamique.

LE PROFIL CULTURAL

Pour qui désire étudier les conditions d'infiltration en milieu cultivé, il est utile, voire indispensable, d'adopter la méthode préconisée par les agronomes (HENIN, GRAS et MONNIER, 1969 ; MANICHON, 1982). Elle consiste à creuser une petite fosse en plein champ qui permette l'examen de la partie travaillée du sol, en d'autres termes l'étude du profil cultural. En relevant certains symptômes (par exemple des taches d'hydromorphie au dessus d'un niveau compacté), elle permet de déceler d'éventuelles erreurs dans le choix des techniques ou des dates de travaux. La mise en

évidence de différenciations dues à l'action des outils (lissages ou semelles de labour, fig.18, voir page 62) fournit des renseignements essentiels à la compréhension de l'infiltration et de l'alimentation hydrique des plantes cultivées. Cette approche morphologique de terrain fait aisément apparaître les problèmes de compaction et de prise en masse, particulièrement sensibles sur les sols sableux de la région semi-aride ouest-africaine.

LES PRINCIPAUX TYPES DE TRAVAIL DU SOL

Nous présenterons, au chapitre 12, l'influence du travail du sol sur la formation des croûtes. Parmi les facteurs les plus déterminants, se range le microrelief induit par les pratiques culturales. C'est sous cet angle que nous présentons les principaux types de travail du sol :

- le travail à plat : il recouvre les préparations manuelles avant le semis, comme le simple grattage superficiel à la houe ("daba" ou "iler" selon les régions), et la confection des poquets (photo n° 185),
- le billonnage (photos n° 37 et n° 63),
- le billonnage cloisonné (fig.29),
- le buttage (photo n° 38),
- le travail en planches (photo n° 196).

Une attention particulière doit, en outre, être apportée au sarclage. Dans la zone semi-aride, cette pratique culturale vise non seulement l'élimination des adventices ("mauvaises herbes") mais aussi la destruction des croûtes superficielles (MILLEVILLE, 1982 ; CHEVALLIER et VALENTIN, 1984). A des sarclages fréquents, correspond une meilleure infiltration au cours du cycle.

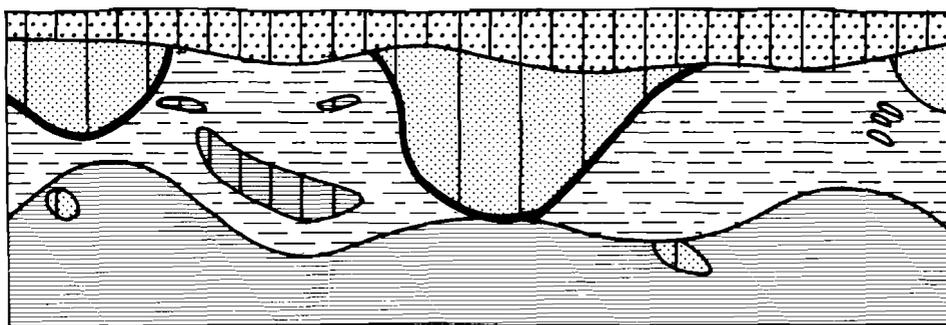
Seuls le travail à plat et le sarclage, et dans une moindre mesure le billonnage et le buttage ont été testés au cours de notre étude. Des parcelles, de longueur bien supérieure à 1 m, s'avèrent en effet indispensables pour mesurer l'effet des autres techniques culturales sur le ruissellement. Tel a été, en partie, l'objectif des campagnes de mesures réalisées sous le grand simulateur de type SWANSON, qui arrose simultanément deux parcelles de 50 m² (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; COLLINET et VALENTIN, 1985).



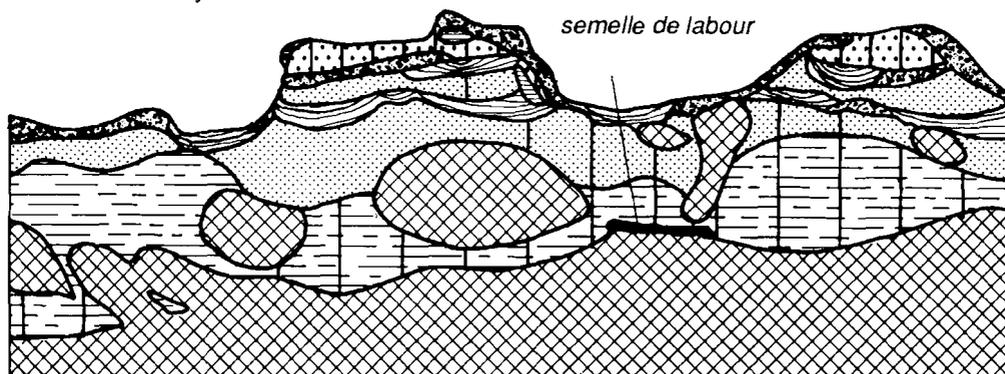
photo 37.
*Parcelle cultivée en billons,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



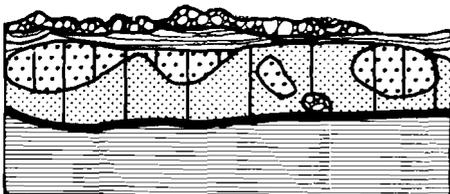
photo 38.
*Parcelle cultivée en buttes, travail localisé préparatoire, mars,
bassin versant de Koumbaka, Mali.
A noter : l' *Acacia albida* Del.*



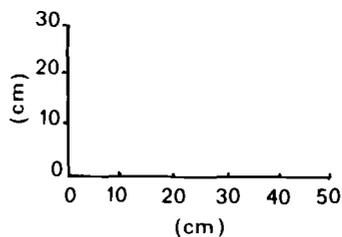
Profil culturel de jachère



Profil culturel d'un sol labouré et billonné



Profil d'un sol travaillé à la houe



- | | |
|--|--|
|  horizon B |  plaçage de récolte de termites |
|  horizon A/B |  croûte structurale (ST1) |
|  |  croûte d'érosion (ERO) enterrée lors des sarclages manuels |
|  volume peu meuble |  croûte de ruissellement (RUI) |
|  volume très meuble à chevelu racinaire |  volume fortement organique |
|  transition progressive |  volume moyennement organique |
|  transition abrupte |  volume compact |

Figure 18.
Exemples de profils cultureux

LES PROCESSUS ET LES FACTEURS DE RÉORGANISATIONS SUPERFICIELLES

LES PROCESSUS DE FORMATION DES CROÛTES DE SURFACE

Dès lors que nous sommes amenés à étudier la structure et le fonctionnement d'organisations pédologiques même très superficielles, nous ne pouvons pas ignorer les processus et les facteurs mis en jeu lors de leur formation.

En premier lieu, reconstituer leur histoire permet d'établir des filiations entre elles, de prévoir ainsi leur évolution et de comprendre leur distribution dans l'espace. C'est pourquoi il importe qu'une typologie ne soit pas seulement fondée sur des caractères morphologiques mais aussi sur des critères génétiques.

Ensuite, l'analyse des facteurs qui président à la formation des croûtes fournit les clefs de la modélisation des processus, et donc de l'évaluation des risques et de leur prévision précise.

Enfin, les travaux de ce type permettent de comprendre la validité des méthodes empiriques de conservation ou d'amélioration de la structure superficielle des sols. Dans ce domaine, seule cette approche peut ouvrir de nouvelles voies. Dans un souci de clarté, nous commencerons par décrire les principaux mécanismes avant d'analyser les facteurs de réorganisation superficielle. Dès ce chapitre, nous serons amenés, toutefois, à évoquer le rôle majeur joué par la taille et la nature des constituants de la surface du sol.

LES PRINCIPAUX MÉCANISMES

Comment se forme une croûte dure et continue à partir d'agrégats bien individualisés (photo n° 39) ? Une telle transformation ne met pas en jeu un mais plusieurs mécanismes. Ceux-ci peuvent intervenir simultanément ou se succéder dans le temps. A cet égard, il est possible de distinguer plusieurs phases au cours d'une pluie : la mobilisation des particules, leur arrachement, leur transport et leur dépôt ; après dessèchement de la surface, le vent peut à son tour provoquer arrachement, transport et dépôt de certaines fractions. Au bilan, l'ensemble de ces processus conduit à une redistribution à la fois verticale et latérale des constituants.

La mobilisation des particules par humectation

Avant d'être arrachées sous l'effet des gouttes de pluies ou du ruissellement, les particules terreuses (particules élémentaires comme des grains de sable, ou petits fragments d'agrégats) doivent être mobilisées. En d'autres termes, certains mécanismes doivent, au préa-

lable, provoquer leur disjonction. De nombreux travaux, entrepris depuis un siècle environ, ont montré que c'est au cours de l'humectation des agrégats qu'intervient cette phase initiale de désagrégation. Schématiquement, elle résulte de trois processus dont l'importance relative varie considérablement selon le type d'humectation, et selon la taille et la nature des matériaux :

Eclatement

Lorsqu'un agrégat sec se trouve plongé dans l'eau (humectation brutale et totale), la succion capillaire attire, avec force, la phase liquide vers son centre. La pression de l'air ainsi emprisonné provoque l'éclatement de l'agrégat dès qu'elle excède sa résistance mécanique (YODER, 1936 ; HENIN, 1938).

Dispersion

L'humectation réduit les forces de liaison entre particules. Dans le cas d'un agrégat de sol très sableux, ce mécanisme peut aller jusqu'à l'effondrement complet de sa structure. Il s'agit alors d'une dispersion grossière.

Pour les sols argileux, surtout s'ils sont riches en sodium, l'humectation entraîne fréquemment une forme analogue de désagrégation : l'agrégat, en se délitant, cède de l'argile comme en témoigne le trouble de l'eau. On parle alors de dispersion argileuse (ou colloïdale). Cette argile ainsi mobilisée peut très facilement migrer dans l'eau d'infiltration (illuviation; McINTYRE, 1958) ou de ruissellement (érosion).

Dans le cas des sols riches en argiles gonflantes, soumis à une pluie intense, la périphérie des agrégats se couvre rapidement d'un matériau boueux. Quand son humidité dépasse une certaine valeur, appelée limite de liquidité, cette boue devient assez fluide pour s'écouler vers le bas et contribuer ainsi au colmatage des interstices entre les agrégats (VALENTIN, 1981).

Fissuration

Lors d'une humectation, même brutale, les agrégats très riches en smectites (plus de 50% d'argile gonflante) ne subissent pas d'éclatement mais une fissuration. Comme ce mécanisme se manifeste même sous vide, il ne peut pas être imputé au piégeage de l'air, mais au gonflement du matériau (KEYRABI et MONNIER, 1968). Or, celui-ci ne concerne pas simultanément l'ensemble de l'agrégat. Cette hétérogénéité du gonflement entraîne des tensions susceptibles de provoquer localement la rupture des liaisons entre particules et

donc des fissures. Pour des agrégats limoneux, moins sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement, la fragmentation par fissuration reste partielle (LE BISSONNAIS, 1987).

Il importe de retenir de cette présentation rapide, qu'à elle seule, l'humectation peut entraîner la désagrégation et la réorganisation de la surface du sol.

L'impact des gouttes de pluie

Plusieurs mécanismes majeurs de dégradation de la surface impliquent nécessairement le choc des gouttes de pluies (ou d'irrigation par aspersion) sur la surface du sol. A telle enseigne que dans le monde agricole francophone, il n'est pas rare de désigner par "croûte de battance" toute forme de réorganisation de surface, même dans les cas, comme ceux tout juste évoqués, où l'action "battante" des gouttes de pluies n'est en rien responsable de leur formation.

La mobilisation des particules

● La dispersion colloïdale

Les chocs, notamment ceux dus aux gouttes de pluie, favorisent nettement la dispersion de la phase argileuse (photo n° 40), (LE BISSONNAIS, 1987), et donc sa mise en suspension dans les eaux d'infiltration, de rejaillissement ou de ruissellement.

● Le fractionnement

L'impact des gouttes provoque généralement le fractionnement, au moins partiel, des agrégats. L'intensité de ce mécanisme dépend de nombreux facteurs, objets

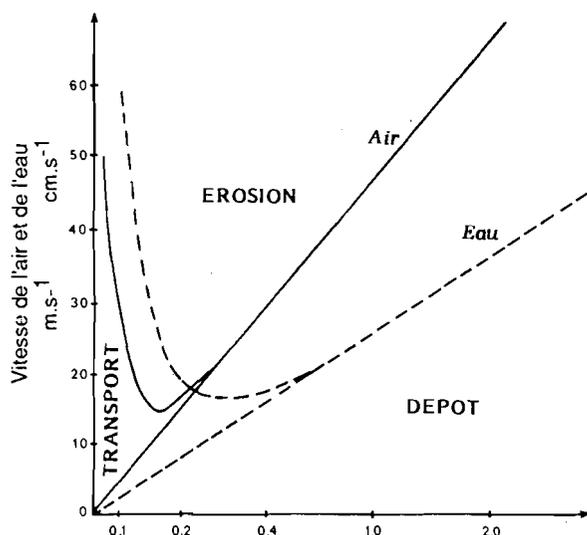


Figure 19.

Comparaison des effets de l'air et de l'eau sur les différentes classes granulométriques. D'après HJULSTRÖM (1935) et BAGNOLD (1937).

du chapitre suivant : taille et vitesse de chute des gouttes, humidité et taille des agrégats, épaisseur de l'éventuelle lame d'eau à la surface du sol.

Le transport par rejaillissement

Les gouttes de pluie qui tombent sur le sol arrachent et projettent alentour des grains de sables ou des fragments d'agrégats. En rebondissant, les gouttelettes se chargent également de particules plus fines (photo n° 58). C'est ce que les anglo-saxons dénomment le "splash", terme traduit par "rejaillissement" (FEODOROFF, 1965). L'intensité du processus et la distance de projection dépendent étroitement de l'énergie cinétique de la pluie, de la texture du matériau (EKERN, 1950) et de la pente : les trajectoires vers l'aval sont en effet plus longues que vers l'amont. Notons qu'à lui seul ce processus, cumulé sur une longue période, peut entraîner un remodelage des versants, en l'absence de tout ruissellement.

Le dépôt

Les particules ainsi déplacées retombent au sol sans orientation privilégiée. Selon leur quantité et leur taille, elles participent plus ou moins rapidement au comblement de la porosité interagrégat et de ce fait à l'épaississement et à l'extension latérale de la croûte (FARRES, 1978, 1987 ; BOIFFIN, 1984).

Le tassement

L'énergie cinétique des gouttes n'est que partiellement dissipée dans la fragmentation des agrégats et dans le rejaillissement. Une part se trouve absorbée par la surface qui subit alors une compaction. Se forme ainsi un niveau moins poreux qui réduit la perméabilité superficielle et favorise l'apparition du ruissellement.

Le ruissellement

Selon la vitesse du ruissellement, une particule de dimension donnée est arrachée, transportée ou déposée. A partir de données expérimentales, HJULSTRÖM (1935) a établi, un diagramme qui permet d'évaluer ces vitesses critiques en fonction de la taille des particules (fig.19).

Arrachement mécanique

En fait, l'arrachement dépend non seulement de la vitesse du ruissellement mais aussi de sa turbulence. Celle-ci est contrôlée par l'épaisseur de la lame d'eau, l'impact des gouttes d'eau et les irrégularités de la surface. Toutefois, il est largement admis de nos jours, (HUDSON, 1971) que l'arrachement dû au ruissellement reste bien inférieur à celui provoqué par l'impact des gouttes de pluies. Les expériences récentes, menées



photo 39.
Transformation d'un lit d'agrégats
en croûte structurale (ST1), périphérie de la zone
arrosée par le minisimulateur,
sol alluvial argileux, cuvette d'Agadez, Niger.



photo 40.
Fermeture de la porosité entre les agrégats,
apparition du ruissellement,
sol alluvial argileux, cuvette d'Agadez, Niger.
A noter : la couleur des filets d'eau s'écoulant
des agrégats exondés qui indique la dispersion
de la phase argileuse.



photo 41.
Simulation de ruissellement sur lit d'agrégats, sol peu évolué
d'apport colluvial hydromorphe, N'Dorola, Burkina Faso.
A noter : la clarté de l'eau, très peu chargée en argile

au Burkina Faso (MAHOP, 1983) et en Côte d'Ivoire (PLANCHON, 1985) sous simulation de ruissellement (photos n° 41, n° 42 et n° 43), confirment le rôle limité du ruissellement dans le détachement des particules.

Transport

C'est davantage dans la redistribution latérale des constituants que réside la principale fonction du ruissellement. Même pour de faibles vitesses de ruissellement, les particules fines peuvent migrer en suspension sur de longues distances. Les particules plus grossières comme les sables, ou les fragments d'agrégats argileux de même dimension, se déplacent par charriage de fond. Cet entraînement est facilité par la turbulence due aux chocs des gouttes de pluie sur la lame de ruissellement.

Dépôt

Les particules peuvent se déposer sous différents types de flux :

- **turbulents.** L'impact des gouttes de pluies produit des turbulences dans la partie supérieure de la lame d'eau. Dans ces conditions, les particules qui se déposent, bien que tassées, ne présentent pas un tri granulométrique très marqué (MÜCHER et DE PLOEY, 1977).
- **laminaires.** Des flux laminaires peuvent s'observer pendant la pluie à la base des lames de ruissellement suffisamment épaisses ou après la pluie dans l'eau qui continue à s'écouler. Les particules qui se déposent alors sont peu tassées mais bien triées (MÜCHER et DE PLOEY, 1977).
- **nuls.** En l'absence de flux latéral, (cas d'une flaque par exemple), les particules se déposent selon la loi de STOKES : la vitesse de sédimentation est d'autant plus faible que leur diamètre est petit. En d'autres termes, les sédiments présentent un tri granulométrique très marqué : les grains les plus grossiers se trouvent à la base et les plus fins en surface.

Remarque terminologique

Comme nous venons de le rappeler, la modalité de dépôt conditionne fortement la granulométrie et la porosité des sédiments. Afin de préciser sans ambiguïté l'origine des dépôts, nous utiliserons dorénavant les termes : "*dépôts de ruissellement*" pour les particules déposées dans un liquide en mouvement et "*dépôts de décantation*" dans un liquide au repos.

La dessiccation

Le retrait

Observons une flaque quelque temps après une pluie : l'eau s'évapore sous l'effet du soleil ou du vent, laissant en surface une croûte grise ou noirâtre qui peu

à peu se craquelle. Bien que liées à l'image de la sèche-resse, ces fissures peuvent tempérer les effets néfastes des croûtes : elles permettent localement la levée des semences; elles favorisent, au moins temporairement l'infiltration de l'eau. D'où l'intérêt que portent depuis longtemps les scientifiques (GRIFFITH, 1920) à l'apparition de ces fentes. Au cours de la dessiccation, les matériaux terreux subissent une diminution de volume (HAINES, 1923). Les contraintes alors développées peuvent entraîner la rupture des matériaux. Cette fissuration s'opère préférentiellement dans :

- les zones de contact de l'argile et des particules plus grossières, sables et limons,
- les zones de contact des argiles rigides et des argiles gonflantes,
- les zones restées les plus humides (du fait de la présence de résidus organiques par exemple).

Un appareil de laboratoire vient récemment d'être mis au point pour mesurer en continu la rétraction, c'est-à-dire la diminution de volume au cours du temps, d'échantillons de sols non perturbés (BRAUDEAU, 1987). Pour des matériaux argileux (TESSIER, 1978, 1984) ou argilo-limoneux (BRUAND, 1986), le retrait, c'est-à-dire la diminution de volume en fonction de l'état hydrique, suivi à partir de la saturation, se décompose en trois phases :

- A : toute perte en eau s'accompagne d'une diminution égale du volume des vides.
- B : le retrait devient inférieur aux pertes en eau. Une part de la porosité reste donc disponible à l'air (il existe ainsi un point remarquable de la courbe, appelé "point d'entrée d'air"),
- C : le volume demeure constant malgré la diminution de teneur en eau. La "limite de retrait" est atteinte. Ce volume minimal dépend du type d'argile. Dans le cas des argiles gonflantes, les particules acquièrent un parallélisme tel qu'elles tendent à n'occuper que le volume théorique minimal. En revanche, les particules argileuses grossières et rigides, comme les kaolinites, restent désordonnées et présentent de ce fait une faible diminution de volume.

Par ailleurs, il a été montré que la présence, même en faible quantité, d'argile gonflante au sein d'un mélange suffit à augmenter très fortement les variations de volume lors du retrait (CAMARA, 1981). Ainsi, comme le soulignent TESSIER et PEDRO (1984), ce sont les argiles qui par leur quantité et leur nature font, des matériaux terreux, des systèmes dont la géométrie varie au cours du temps.

L'induration

C'est souvent sa dureté particulière, supérieure à celle du sol sous-jacent qui signale la présence d'une croûte



photo 42.
 Etat structural après simulation de ruissellement,
 sol peu évolué d'apport colluvial hydromorphe,
 N'Dorola, Burkina Faso.
 A noter : la faible évolution structurale
 des agrégats.



photo 43.
 Etat structural après simulation de pluie
 et simulation de ruissellement, sol peu évolué
 d'apport colluvial hydromorphe,
 N'Dorola, Burkina Faso.
 A noter : l'évolution structurale marquée
 des agrégats sous l'effet de la pluie, à comparer
 avec la photo précédente.



photo 44.
 Transport de sable par saltation,
 Ader Doutchi, Niger.

à la surface du sol. Par ailleurs, cette propriété mécanique s'avère particulièrement préjudiciable à la levée des semences. Au fur et à mesure qu'une croûte se dessèche, ses constituants se rapprochent les uns des autres. Ce faisant, les forces de liaison (Van der Waals) et donc la cohésion générale du matériau augmentent. Ainsi la dureté des croûtes s'accroît exponentiellement en fonction de la diminution de leur humidité (VALENTIN, 1986c).

Action du vent

En région aride, le vent joue un rôle majeur dans le tri et la redistribution latérale des constituants de la surface du sol. Comme pour le ruissellement, c'est sa vitesse qui détermine, pour une taille de particule donnée, l'arrachement, le transport ou le dépôt. Ainsi BAGNOLD (1937) a proposé pour le vent un diagramme analogue à celui de HJULSTRÖM (1935) pour l'eau (fig.19).

Arrachement

● Déflation

La déflation est l'érosion éolienne qui s'exerce sur une surface meuble. Elle est facilitée par de faibles teneurs en eau et par la mobilisation préalable des particules : émiettement par le travail du sol, fractionnement des agrégats, disjonction des grains de sable et de

l'argile sous l'effet des pluies,... Il est également nécessaire que le vent atteigne, pour une particule donnée, un seuil de vitesse. Dès lors, on comprend que les obstacles : rugosité du sol, végétation,... qui réduisent la vitesse du vent diminuent les risques de déflation. Comme pour le ruissellement, la vitesse critique d'arrachement passe par un minimum pour les particules de 100 microns. Pour le vent comme pour l'eau, les particules plus fines résistent davantage du fait, d'une part de leur plus forte cohésion, d'autre part de la protection exercée par les particules les plus grossières.

● **corrasion.** Il s'agit de l'érosion d'un matériau consolidé sous l'effet d'un vent chargé en sable. Même les croûtes les plus résistantes à l'érosion hydrique peuvent se dégrader rapidement sous l'effet de ce mécanisme.

Transport

On distingue généralement trois modes de transport par le vent : (fig.20)

● **Le transport par suspension.** Une fois arrachées du sol, les particules les plus fines peuvent être transportées sur de très grandes distances si leur vitesse de chute reste inférieure à la portance du vent. C'est ainsi qu'à l'échelle de l'Afrique, le Sahara est connu comme une région qui s'appauvrit en particules fines et la zone de forêt tropicale de l'Afrique de l'Ouest comme une région de dépôt.

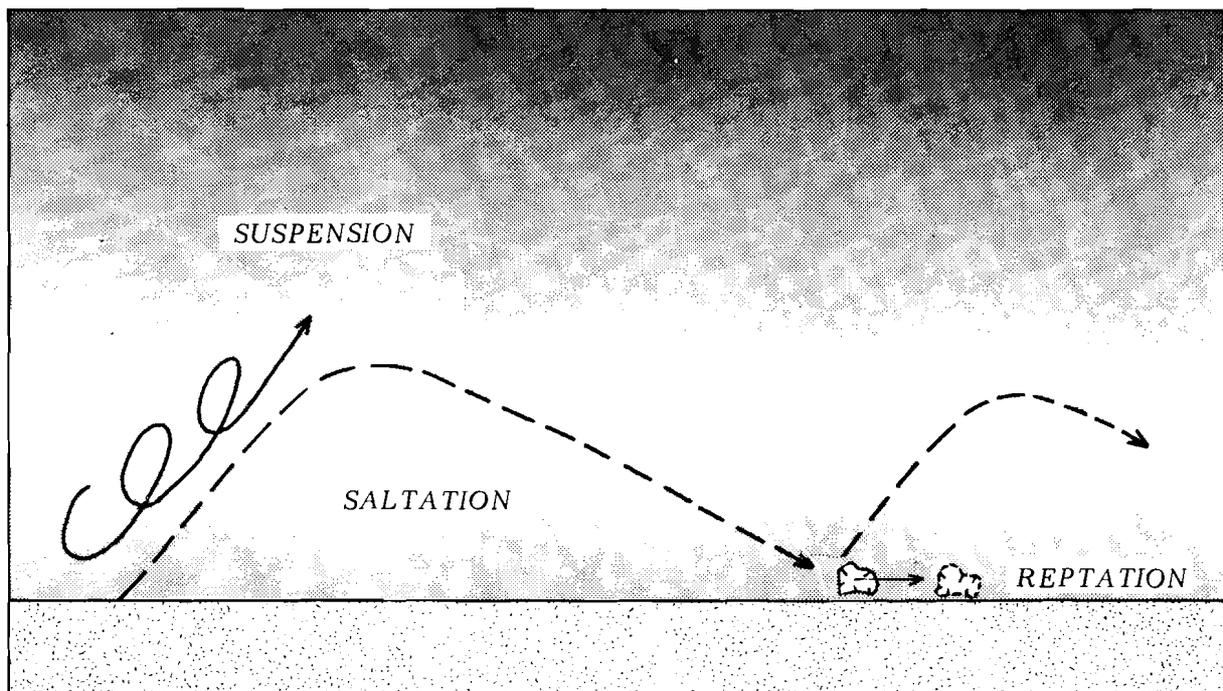


Figure 20.

Mouvements de particules sous l'effet du vent



photo 45.
 Lit d'agrégats avant la simulation de pluie,
 sol argileux, Agadez, Niger.
 A noter : l'hétérogénéité de la taille des mottes.



photo 46.
 Etat structural de la même parcelle
 après 10 minutes de pluie (60 mm h^{-1}).
 A noter : le gonflement des agrégats et le début
 de colmatage des vides inter-agrégats.



photo 47.
 Etat structural de la même parcelle
 après 17 minutes de pluie.
 A noter : la mise en place de la croûte structurale
 (ST1); le colmatage des vides inter-agrégats
 provoque la formation des flaques.
 Le ruissellement est apparu 4 minutes
 après cette prise de vue.

● **Le transport par saltation** (photo n° 44). Il s'agit du déplacement sous forme de bonds. Il concerne surtout les grains de sables dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm.

● **Le transport par reptation**

Les particules plus grosses migrent essentiellement par reptation sous l'effet du choc des particules en saltation qui communiquent une partie de leur énergie cinétique en retombant au sol. Aussi, en zone sahélienne n'est-il pas rare de voir se déplacer à la surface du sol des sables grossiers, voire des graviers, sous l'effet des vents violents de fin de saison sèche.

Dépôt

Selon BAGNOLD (1937), il existe trois formes de dépôts :

- La sédimentation vraie : les particules en suspension se déposent lorsque la portance du vent diminue suffisamment.
- L'apposition ("accretion") : du fait d'un obstacle, la vitesse du vent diminue localement ; les particules se déposent alors, après s'être déplacées sur une certaine distance au sol.
- L'empiétement ("encroachment") : la vitesse du vent reste la même mais les particules en reptation sont retenues par un obstacle ; elles se déposent tandis que les particules en saltation poursuivent leur course.

Le tri granulométrique

Que ce soit lors de l'arrachement, du transport ou du dépôt, le vent opère un tri granulométrique, le vannage. De ce fait, il exerce un rôle déterminant dans l'évolution des surfaces en zone sahélienne, rôle que nous soulignerons à maintes reprises au cours de cet ouvrage.

TYPOLOGIE GÉNÉTIQUE DES CROÛTES

Dès à présent, il nous est possible de distinguer plusieurs types de croûtes selon leur mode de formation. Elles correspondent aux différentes phases présentées précédemment (photos n° 45 à n° 49).

Croûte structurale ("structurale" est une ellipse pour signifier "effondrement sur place de la structure")

Processus dominant :

mobilisation des particules et rejaillissement

Suivant la taille des constituants, deux grands types peuvent être distingués :

● **matériau argileux :**

Les différents processus de mobilisation des parti-

cules interviennent lors de la phase d'humectation et préparent ainsi leur détachement par les gouttes de pluies. Les vides entre les agrégats se trouvent peu à peu comblés par les grains de sables et les fragments d'agrégats préalablement disjoints. De la croûte qui se forme alors, émergent les agrégats les plus gros au départ, fortement émoussés. La formation de cette croûte a été modélisée par BOIFFIN (1984) et par FARRÉS (1986). Elle conditionne l'apparition du ruissellement.

● **matériau sableux :**

Du fait de la faible cohésion des matériaux sableux, la disjonction des constituants s'opère très aisément. Dès les premières minutes, l'impact des gouttes de pluie entraîne la formation de petits cratères à fond compacté. Par un effet de tamis, les éléments les plus fins se concentrent à ce niveau tandis que les sables les plus grossiers se concentrent à la base de la croûte, un niveau de concentration de particules fines, très peu épais, de l'ordre du millimètre, mais dur. Lors des pluies, ce type d'organisation réduit non seulement l'infiltration mais aussi la sortie de l'air qui, emprisonné dans la croûte, forme alors des bulles. Celles-ci conservent leur forme au cours des dessiccations, d'où l'abondance des petites cavités sphériques ("des vésicules") au sein des croûtes de ce type.

Sous l'effet cumulé de nombreuses pluies, ce tri granulométrique concerne également les sables. Ainsi observe-t-on depuis la surface : les sables les plus grossiers, puis les sables fins, légèrement pris en masse, enfin, à la base de la croûte, un niveau de concentration de particules fines, très peu épais, de l'ordre du millimètre, mais dur. Lors des pluies, ce type d'organisation réduit non seulement l'infiltration mais aussi la sortie de l'air qui, emprisonné dans la croûte, forme alors des bulles. Celles-ci conservent leur forme au cours des dessiccations, d'où l'abondance des petites cavités sphériques ("des vésicules") au sein des croûtes de ce type.

Croûte de ruissellement

Il s'agit des différents sédiments déposés dans la lame de ruissellement, plus ou moins consolidés lors de la dessiccation. Très fréquemment, ils recouvrent une croûte structurale.

Croûte d'érosion

Processus dominant :

arrachement par l'eau et par le vent.

Une croûte d'érosion peut se former aux dépens :

- d'une croûte structurale argileuse : le choc répété des gouttes de pluie sur la croûte qui reste exondée conduit à la formation d'une pellicule très compactée, souvent enrichie en éléments fins (VALENTIN et RUIZ FIGUEROA, 1987). Il s'en suit une diminution de la rugosité et une disparition progressive de tout reste d'agrégat;
- d'une croûte structurale sableuse : nous avons vu que les sables fins d'environ 100 microns sont les plus sensibles à l'arrachement par les eaux de ruissellement et par le vent. Les couches sableuses supérieures

photo 48.
 Etat structural de la même parcelle
 après la seconde séquence pluvieuse
 (hauteur de pluie cumulée = 100 mm).
 A noter : la structure fragmentaire altérée
 des agrégats exondés;
 seuls les plus gros ont résisté.
 La croûte de ruissellement (RUI) entre les agrégats.



photo 49.
 Etat structural de la même parcelle,
 deux jours après la troisième séquence pluvieuse
 hauteur de pluie cumulée = 150 mm).
 A noter : les nombreuses fentes de retrait.



photo 50.
 Surface de vertisol, fentes de retrait,
 bassin versant de Galmi, Niger.



des croûtes structurales peuvent donc aisément subir la déflation. Subsistent alors en surface le niveau le plus dur, constitué des éléments les plus fins, et éventuellement les particules les plus grossières.

- d'une croûte de ruissellement : à mesure que la rugosité du terrain diminue, la vitesse du ruissellement augmente, limite ainsi les mécanismes de dépôt et accentue l'arrachement. C'est ainsi qu'une croûte de dépôt peut s'éroder jusqu'à la mise à l'affleurement de la croûte structurale qui se transforme en croûte d'érosion.

Croûte de dépôts éoliens

Le sable fin qui subit la déflation éolienne se dépose dès que le vent heurte un obstacle : petites dunes ou barrière végétale. Ces croûtes, généralement constituées d'un grand nombre de lits sableux, bien triés, évoluent généralement en croûtes de dessiccation, ou si elles subissent des apports de particules plus fines, en croûtes structurales.

Croûte de décantation

C'est la croûte qui se forme après sédimentation de particules dans un liquide au repos : le tri granulométrique très marqué entre les différents lits qui la constituent, d'éléments grossiers à la base, fins en surface,

favorise la formation des fissures et des fentes au cours de la dessiccation.

Croûte de dessiccation :

Les processus de réorganisation peuvent se réduire aux seuls mécanismes mis en jeu lors des cycles d'humectation-dessiccation. Ainsi, pour un matériau très sableux, presque entièrement dépourvu d'argile, bien protégé de l'impact des gouttes de pluies, par le couvert herbacé par exemple, le seul mécanisme consiste en une légère prise en masse des premiers millimètres, voire des tout premiers centimètres. Cette légère augmentation de la cohésion pourrait être imputée à la formation de ponts de gels de silice entre les grains de quartz : certaines expériences de laboratoire (GIFFORD et THRAN, 1974) ont en effet montré que les ménisques qui se forment entre les grains de sable au cours de la dessiccation favorisent la concentration de gel de silice amorphe sous forme de ponts. Ainsi, même en l'absence totale d'argile, la force nécessaire pour séparer des billes de silice augmente avec le nombre de cycles humectation-dessiccation. Ce phénomène serait particulièrement sensible à la surface du sol où la saturation et la dessiccation sont les plus marquées. Toutefois, la cohésion de ce type de croûte reste faible : elle se brise aisément sous la pression des doigts.

LES FACTEURS DE RÉORGANISATION SUPERFICIELLE

LES FACTEURS INTRINSÈQUES

Nous considérons comme facteurs intrinsèques ceux qui sont le moins soumis à des variations saisonnières ou à l'intervention de l'homme. Il s'agit des facteurs les plus constants de l'environnement, les moins facilement contrôlables.

Le sol

L'organisation pédologique

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 7, la classification française des sols est établie principalement à partir des caractères des horizons profonds. On conçoit, dès lors, la difficulté qui en résulte pour déduire des comportements de surface au travers de cette approche. Est-ce à dire que, dans cette perspective, les cartes pédologiques ne nous sont d'aucune utilité ? Certes non : même si ce n'est pas la règle générale, certains types de sols correspondent à des états de surface et à des comportements caractéristiques. Citons :

- Les *vertisols* : les phénomènes de gonflement et de

rétraction favorisent l'apparition de fentes et, parfois d'un microrelief particulier "en gilgai" (photo n° 50, n° 67 et n° 95). Comme l'ont montré JAILLARD et CABIDOCHÉ (1984), ce microrelief, à l'origine de la redistribution de l'eau au bénéfice des microdépressions, participe avec les fissures à l'hétérogénéité hydrique de ces sols.

- Les *sols bruns eutrophes* : (photo n° 51) leur structure résiste bien aux phénomènes de réorganisation superficielle. Toutefois, leur position topographique, souvent en piémont, les expose à l'érosion linéaire.
- Les *sols halomorphes* : (photo n° 52 et n° 128) à l'inverse des sols précédents, ils sont très sensibles à la formation de croûtes superficielles.

Par ailleurs, l'apparition, à faible profondeur, d'un horizon imperméable ou à drainage très ralenti, favorise la saturation des horizons sus-jacents. Cet engorgement peut remonter jusqu'en surface et favoriser alors l'effondrement de la structure. Ajoutons que les interactions entre le sol et la surface présentent bien d'autres aspects que nous mentionnerons dans les 4^{ème} et 5^{ème} parties.

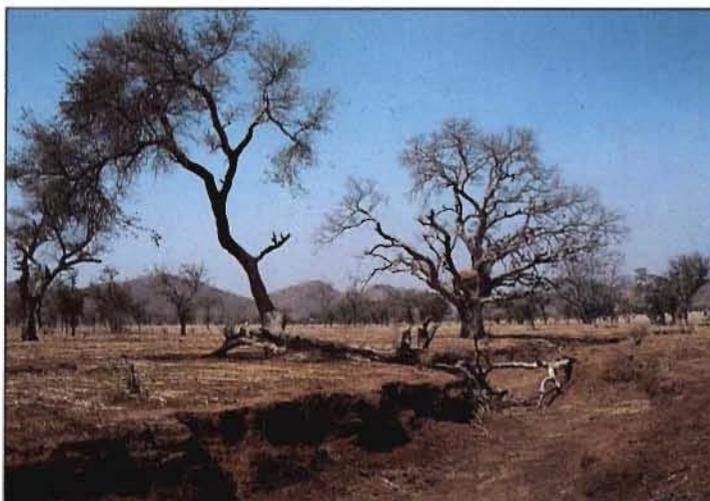


photo 51.
Sol brun eutrophe d'une dépression périphérique,
raviné, région de Sabouna, Burkina Faso.
A noter : l' *Acacia albida* Del.

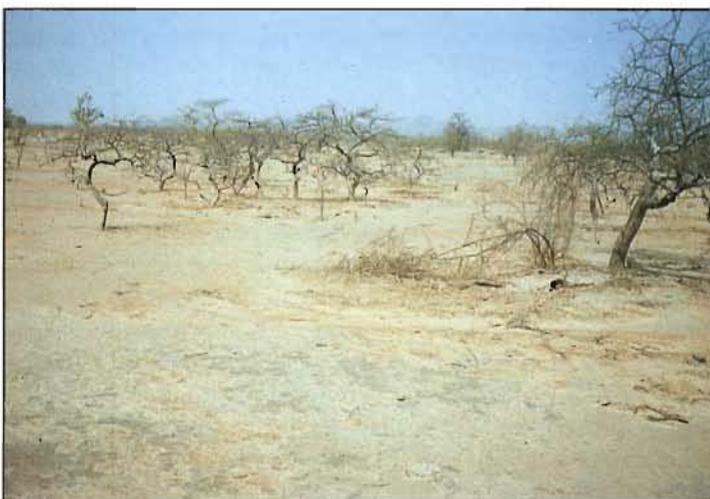


photo 52.
"Hardé", croûte d'érosion (ERO),
sur sol halomorphe, région de Méri, Cameroun.
A noter : les *Lanea humilis* (Oliv.) Engl.,
caractéristiques de ce milieu.



photo 53.
Eléments grossiers inclus dans une croûte
(type G), bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : la porosité vésiculaire importante
à la base de la croûte.

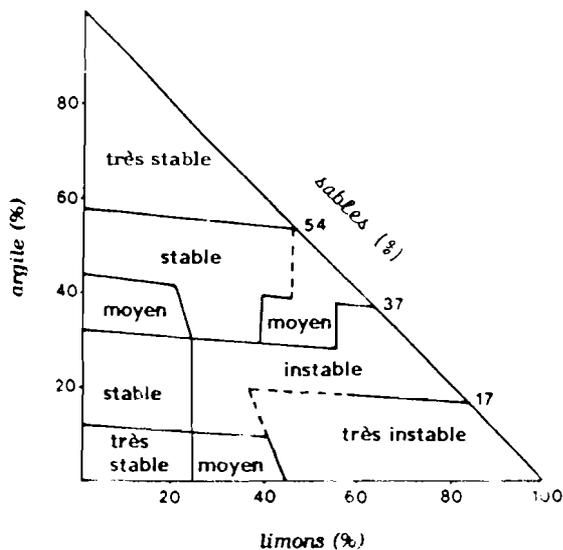


Figure 21.

Triangle textural renseigné en classes de stabilité
D'après MONNIER et STENGEL (1982)

Les propriétés physico-chimiques

Le test d'instabilité structurale

De très nombreux tests ont été proposés pour caractériser la sensibilité des sols aux processus de réorganisation superficielle. C'est assurément celui développé, à la fin des années 1950, par la Recherche Agronomique (HENIN et MONNIER, 1956 ; HENIN, MONNIER et COMBEAU, 1958) qui est le plus utilisé par les pédologues francophones. Rappelons les particularités de cette méthode : le séchage et la fragmentation fine de l'échantillon avant le test. Ces deux opérations ont pour but de s'affranchir des conditions contingentes : états hydrique et structural. On cherche ainsi à évaluer la stabilité intrinsèque du matériau. De plus, deux prétraitements avant le tamisage sous l'eau permettent d'affiner le diagnostic : le taux d'agrégats stables après le prétraitement des échantillons à l'alcool est très sensible à leur cohésion à l'état humide. Celle-ci dépend de la texture et de la garniture ionique. Le taux d'agrégats stables après le prétraitement au benzène reflète leur mouillabilité, liée à la matière organique. Ce test d'instabilité structurale, strictement normalisé (FEODOROFF, 1960), permet, comme le rappelle MONNIER (1985), l'évaluation générale du risque de désagrégation, et peut être employé pour l'évaluation de la fertilité physique (BOIFFIN et MONNIER, 1982). En outre, il est utilisé pour détecter, de façon précoce, des évolutions liées par exemple à la teneur en matière organique (QUANTIN et COMBEAU, 1962; MONNIER, 1965), ou à la composition ionique.

Toutefois, cette méthode, depuis quelque temps, fait l'objet de critiques. Si l'on se réfère aux trois principaux mécanismes de mobilisation des particules lors de l'humectation (cf. chapitre précédent), il apparaît, en effet, qu'elle n'en prend en compte que deux (LE BISSONNAIS, 1987) : la dispersion et l'éclatement. Or, le troisième mécanisme, la fissuration, ne doit pas être ignoré, surtout dans le cas des sols argileux (KHEYRABI et MONNIER, 1968) et des sols limoneux (BOIFFIN, 1984). En outre, ce test accentue le phénomène d'éclatement puisque les échantillons sont préalablement desséchés. Comme corollaire, il a tendance à amplifier le rôle bénéfique de la matière organique (BOIFFIN, PAPY et PEYRE, 1986).

Les principaux paramètres

● La granulométrie

Afin de mettre en évidence l'influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale, le test précédent a été appliqué sur des mélanges de textures variées, dépourvus de matière organique (KHEYRABI, 1966 ; KHEYRABI et MONNIER, 1968). Cette expérimentation a permis de définir différentes classes d'instabilité en fonction de la composition granulométrique des sols (MONNIER et STENGEL, 1982 - fig.21).

En fait, les sables, considérés comme très stables à partir du test d'instabilité structurale, présentent une forte instabilité sous l'impact des gouttes de pluies (cf. chapitre précédent). Ainsi, POESEN (1986) montre que ce sont les mélanges comportant 90% de sable et 10% de limon qui présentent la plus forte baisse d'infiltrabilité mesurée sous pluie simulée. KEMPER et NOONAN (1970) observent les ruissellements les plus forts pour des sols encroûtés contenant entre 50 et 80% de sable.

Par ailleurs, ce sont les croûtes formées sur les sols argileux qui offrent le nombre de contacts entre particules le plus élevé et sont donc les plus dures (SHARMA et AGRAWAL, 1980).

Comme le soulignent DE PLOEY et BRYAN (1986), la présence d'*éléments grossiers* en surface joue un rôle ambivalent sur le ruissellement :

- D'une part, ils protègent la surface de l'impact des gouttes d'eau, diminuant ainsi les risques de réorganisation. Simplement posés sur le sol, ou sous forme d'horizon gravillonnaire dépourvu de terre fine, ils augmentent ainsi l'infiltrabilité (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 ; POESEN, 1986).
- D'autre part, ils imperméabilisent localement le sol et favorisent d'autant la concentration de l'eau. Les résultats exposés dans cet ouvrage montrent qu'ils interviennent le plus souvent dans le sens d'une augmentation du ruissellement (cf. chapitre 15). En

effet, dans le cas le plus fréquent, les éléments grossiers se trouvent inclus dans une croûte (photo n° 53).

- **La nature minéralogique des argiles**

La nature de l'argile revêt également une grande importance dans les processus de réorganisation superficielle : les argiles gonflantes (smectites), comme la *montmorillonite*, présentent une plus forte sensibilité à la dispersion par liquéfaction et à la fissuration que les argiles peu gonflantes comme les *kaolinites*. De plus, les particules de smectites, nous l'avons vu, occupent le volume le plus faible à l'état sec (TESSIER, 1984 ; BRUAND, 1985), et confèrent ainsi, à la croûte une fois formée, les résistances à la pénétration les plus élevées (LEMOIS et LUTZ, 1957; FATTON, 1976). Signalons que, la *chlorite* tend à augmenter la cohésion des croûtes (PAGE, 1979), tandis que la *vermiculite* la réduirait (GOYAL, NELSON et CARPENTIER, 1979).

- **La composition chimique et la garniture ionique de la phase argileuse**

Parmi les éléments qui assurent la stabilité des agrégats, citons le *fer* (FARRES, 1987, et bien d'autres auteurs) et l'*aluminium* (DESPHANDE, GREENLAND et QUIRK, 1964). Le *calcium* sous forme de carbonates est moins efficace que le gypse (BEN-HUR et al., 1985). Quant au *magnésium*, son action s'avère néfaste lorsqu'il excède 50% des bases totales (COLLINET, comm. orale, 1988). Tel est le cas de quelques sols du Burkina étudiés à l'aide du simulateur de type SWANSON : sol brun vertique, sol brun eutrophe vertique, sol ferrugineux appauvri (COLLINET et LAFFORGUE, 1979).

Des teneurs en *sodium* échangeable supérieures à 15-20% facilitent la dispersion des argiles et donc la formation des croûtes de surface. SHAINBERG (1985) précise que, sous pluie naturelle de forte intensité, ce seuil peut être abaissé à 3-5%, dès lors que les agrégats présentent une cohésion initiale faible. Par ailleurs, la dureté des croûtes est d'autant plus marquée qu'elles sont riches en sodium (ALPEROVITCH et DAN, 1973).

De même, la présence de sels solubles dans certains sols alluviaux favorise la formation des croûtes (RADWANSKY, 1968 ; MOUGENOT, 1983). Comme nous le verrons plus loin (chapitre 15, §6.3), les processus d'évaporation entraînent la précipitation de ces sels en surface, et donnent naissance, sur les sols sulfatés acides du Sénégal, à des *efflorescences salines* spectaculaires (LE BRUSQ et al., 1987 ; photos n° 101 et n° 102).

- **Le statut organique**

Comme agent hydrophobe, la matière organique réduit la mouillabilité des agrégats et diminue les

risques d'éclatement lors de l'humectation. C'est pourquoi de nombreuses études ont fait apparaître d'étroites relations entre la teneur en matière organique et la stabilité structurale (MONNIER, 1965; HOFMAN, DE LENHEER et APPELMANS, 1974; BOIFFIN, PAPY et PEYRE, 1986 ; ...). Même si cet effet s'exprime de moins en moins dans les pays tempérés, où les systèmes de culture conduisent à des gammes très étroites de teneurs en matière organique (BOIFFIN, 1984), il reste très sensible dans notre zone d'étude : les très faibles teneurs des sols sahélics ne font qu'accroître leur vulnérabilité à l'encroûtement. De plus, la diminution du stock organique qui accompagne la réduction de la durée de la jachère (CHARREAU et NICOU, 1971) induit une aggravation de l'instabilité structurale (QUANTIN et COMBEAU, 1962).

Plus que les teneurs, c'est la nature de la matière organique qui contrôle la stabilité structurale (MONNIER, 1985) : le retournement d'une prairie ("engrais verts") améliore très sensiblement la stabilité structurale mais cette action bénéfique n'est que de très courte durée, de l'ordre de quelques mois. A l'inverse, l'enfouissement de paille, et mieux encore l'apport de fumier ont un effet moins spectaculaire, mais beaucoup plus durable, sensible sur plusieurs années (photo n° 183). Des essais de longue durée (40 ans) ont montré que le taux d'agrégats stables à l'eau pouvait être augmenté d'environ 50% par l'apport de fumure organique (FRANKEN et HURTMANN, 1986). On comprend, dès lors, le rôle bénéfique des troupeaux sur l'enrichissement des champs, en saison sèche, pierre angulaire des systèmes agropastoraux sahélics (photos n° 54 et n° 131).

Il importe d'ajouter que ce n'est qu'au-delà d'une certaine valeur du rapport :

$$\frac{\% \text{ matière organique} \times 100}{\% \text{ argile}}$$

de l'ordre de 7 que s'exerce réellement l'influence de la matière organique sur la stabilité structurale (MONNIER et STENGEL, 1982). Ainsi, pour les sols ne contenant que 10% d'argile, la valeur seuil de matière organique n'est que de 0,7 % (contre 3,5%, pour 50% d'argile).

De plus, la dureté des croûtes varie en fonction inverse de leur teneur en matière organique (HANKS, 1960).

- **L'hydrophobie**

Plusieurs auteurs (BOND, 1964 ; DABANO, 1969; ROBERTS et CARBON, 1972) ont attiré l'attention sur l'hydrophobie de certaines surfaces. Malgré une texture souvent sableuse et une forte porosité, ces sols présentent une infiltrabilité réduite. Ce phénomène est lié aux résidus organiques de certaines plantes qui, soit à l'état

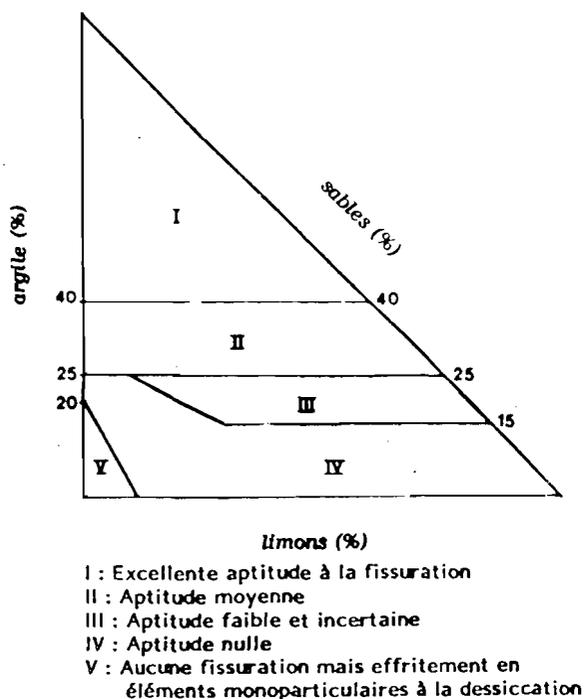


Figure 22.

Triangle textural renseigné en classes d'aptitude à la fissuration. D'après MONNIER et STENGEL (1982)

frais, soit au contraire très humifiés, produisent des composés hydrophobes. Toutefois, une étude approfondie, menée sur des sols dunaires du Mali (RIETVEL, 1978) a démontré que la part du ruissellement due à l'hydrophobie, induite par la présence en surface de certaines algues (Cyanophycées), était très inférieure à celle imputable à l'existence de croûtes superficielles.

● L'aptitude à la fissuration

Elle reflète l'intensité des mécanismes de division sous l'effet du gonflement et du retrait, lors des phases d'humectation et de dessiccation (photo n° 55). Elle peut être considérée comme un caractère intrinsèque du sol, étroitement lié à la composition granulométrique (MONNIER et STENGEL, 1982, figure 22) et à la nature minéralogique de la phase argileuse (TESSIER et PEDRO, 1984).

Les facteurs topographiques

L'inclinaison de pente

Sur une longueur d'un mètre, l'inclinaison de la pente n'intervient pas de manière sensible sur l'infiltration (CASENAVE et GUIGUEN, 1978 ; CASENAVE, 1982). Pour des pentes plus longues, de 10 m par exemple sous le simulateur de type SWANSON, le ruissellement augmente avec la pente sur des sols non ou faiblement encroûtés. A l'inverse, si les sols sont sensibles à l'encroûtement, le ruissellement diminue

(LAFFORGUE et NAAH, 1976 ; ROOSE, 1981 ; POESEN, 1984). En effet, l'intensité des processus de réorganisation superficielle varie en sens opposé à l'inclinaison de la pente. Plusieurs explications ont été avancées (POESEN, 1986) :

- Sur les pentes fortes, l'érosion en nappe est suffisamment marquée pour déblayer les matériaux au fur et à mesure de leur détachement par la pluie, s'opposant ainsi à la formation d'une croûte.
- La densité et la profondeur des griffes d'érosion croissent avec la pente. Or, ces griffes présentent souvent une meilleure infiltrabilité que les surfaces inter-griffes.
- Pour une pluie tombant à la verticale, le nombre de gouttes par unité de surface diminue lorsque la pente augmente. Il en est de même pour la composante verticale de la force d'impact qui varie en fonction du cosinus de l'angle que forme la surface du sol avec la verticale.

Sur des petits bassins versants, RODIER (document inédit) montre que le coefficient de ruissellement augmente avec la pente jusqu'aux environs de 2,5% et reste stable au-delà de cette limite (fig. 23).

La longueur de pente

Sous pluies naturelles, LAL (1976) a obtenu, sur des parcelles de 37 m de long, des coefficients de ruissellement inférieurs à ceux mesurés sur 12 m. De même, sous simulation de pluie, pour des parcelles travaillées manuellement de 1 m, 2 m, 5 m et 10 m, sur un même sol et sur une pente de 6%, VALENTIN (1978) a montré que le coefficient de ruissellement a tendance à diminuer au-delà de 2 m. L'interprétation de ces variations serait proche de celle fournie pour l'inclinaison de pente : la densité des griffes augmente avec la longueur

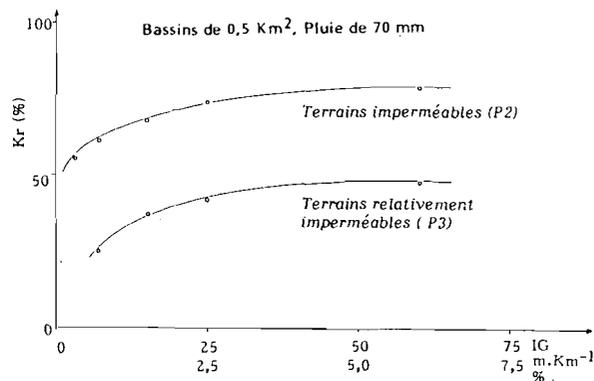


Figure 23.

Variations du coefficient de ruissellement en fonction de la pente



photo 54.
*Troupeau de bovins dans un champ de mil,
en saison sèche, dont les déjections
enrichissent le stock organique du sol,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



photo 55.
*Fente de retrait dans un sol alluvial argileux,
vallée du fleuve Sénégal, Sénégal.*



photo 56.
*Tornade tropicale,
station de recherche de la mare d'Oursi,
Burkina Faso.*

de pente. En outre, la lame d'eau s'épaissit à l'aval et protège d'autant mieux la surface du sol de l'impact des gouttes. Pourtant, comme pour l'inclinaison, il ne semble pas exister une relation simple entre la longueur de pente et la sensibilité à l'encroûtement. En dépit de très nombreuses données, WISCHMEIER (1966) n'a pas réussi à mettre en évidence d'influence significative.

La forme de la pente

Pour une inclinaison générale et une longueur de pente données, le ruissellement diminue depuis les formes convexes jusqu'aux formes concaves en passant par les formes planes (WISCHMEIER, 1974). En effet, les ondulations du relief, particulièrement aux échelles fines, déterminent le type de croûte.

LES FACTEURS EXTERNES

Une méthode d'étude au champ :

le calibre minimum D_{min}

Le test d'instabilité structurale ne fournit pas de prédicteurs de réorganisation superficielle *in situ*. Or, pour analyser les facteurs externes, il est nécessaire de disposer de paramètres simples qui permettent de suivre ces évolutions morphologiques dans les conditions au champ. Plusieurs méthodes ont été proposées. Nous présentons brièvement ici celle de BOIFFIN (1984), élaborée dans un contexte tempéré mais qui, à l'expérience, semble bien adaptée aux conditions tropicales.

Il s'agit du calibre du plus petit fragment d'agrégat non encore incorporé dans les plaques continues formées par la croûte structurale. 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 linéaire significative peut généralement être

établie entre D_{min} et l'énergie cinétique des pluies, cumulée par classe d'intensité. La valeur du coefficient de pente de la régression peut être considérée comme caractéristique de la sensibilité du sol à l'encroûtement.

L'eau

La pluie

Le type et le degré de réorganisation superficielle dépendent en premier lieu des modalités d'apport de l'eau :

- sous forme de pluie : naturelle ou artificielle (pluie simulée ou irrigation par aspersion),
- sous lame d'eau : inondation, remontée de nappe, irrigation gravitaire.

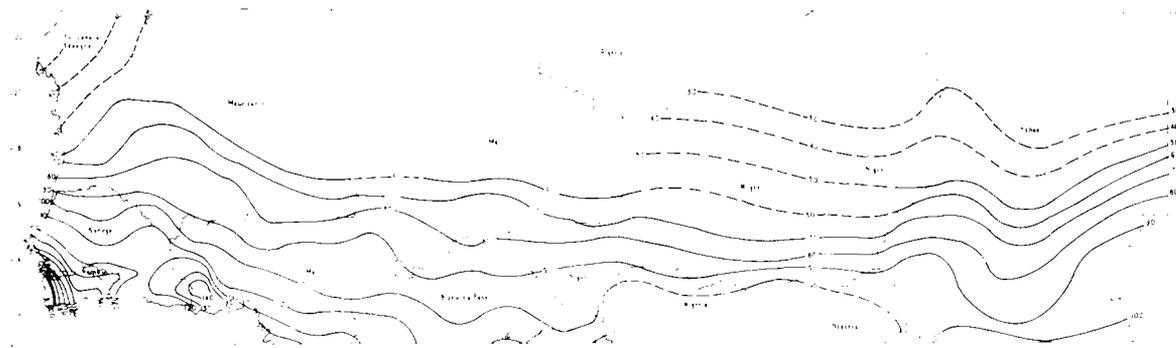
Dans tous les cas, il importe de prendre en considération non seulement les quantités d'eau, mais aussi les intensités, et les fréquences d'apport (photo n° 56). Nous insisterons ici sur le cas le plus fréquent : l'apport pluvial. Dans cette perspective, il nous semble opportun de rappeler les principales caractéristiques des pluies sahéliennes.

Les précipitations exceptionnelles

L'étude des pluies journalières de fréquence rare a fait l'objet de nombreux travaux dans la zone sahélienne : BRUNET-MORET pour le Burkina Faso (1963), le Niger (1963) et le Tchad (1966), DEGOULET (1984) pour le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. L'ensemble de ces travaux est synthétisé dans un rapport du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (1985) d'où est extraite la carte n° 6 sur laquelle sont reportées les isohyètes des pluies journalières de fréquence décennale.

Relations Intensités - Durées - Fréquences

La répartition des intensités dans le temps en fonction de la période de retour de l'averse a été étudiée par BRUNET-MORET (1963, 1966). Cet auteur a montré qu'à hauteur journalière et durée égales, les intensités croissent lorsque la hauteur des précipitations annuelles diminue, tout au moins pour les fortes intensités.



Carte n° 6

Isohyètes des pluies journalières de fréquence décennale 89

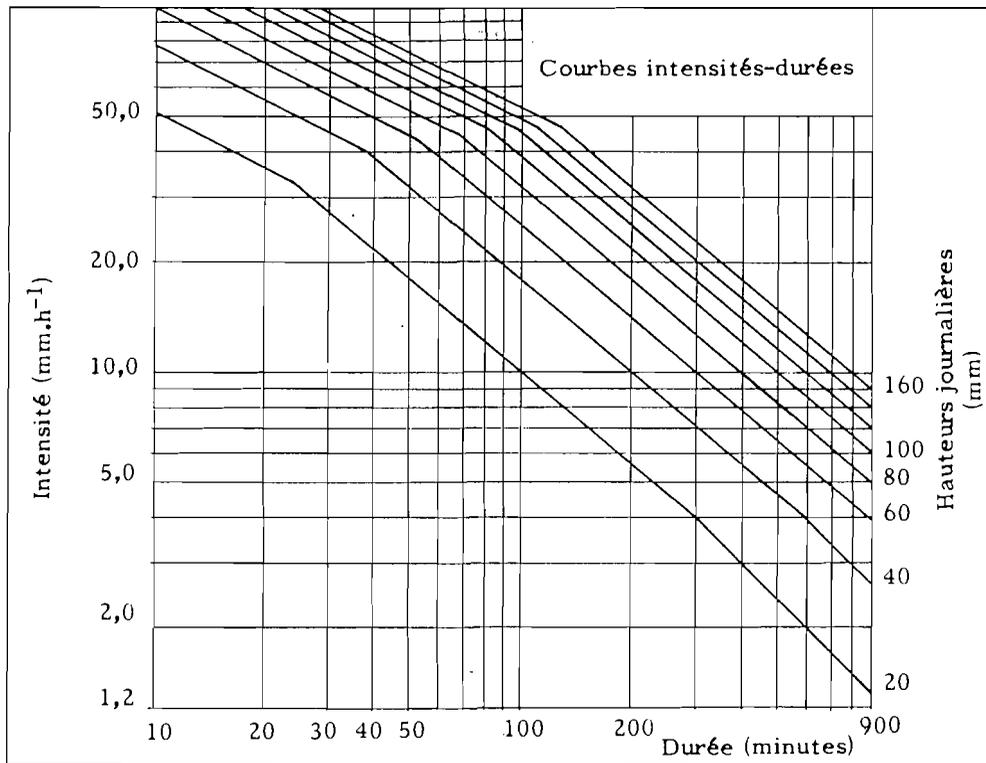


Figure 24.
 Courbes intensités-durées de la région de Bamako

A partir d'un graphique type, représentant les courbes intensités-durées de la région de Bamako (fig.24), on peut déterminer les courbes intensités-durées de pratiquement toute la zone sahélienne (à l'exception des régions subissant une influence océanique) en multipliant les intensités du graphique type par un coefficient qui est fonction de la hauteur de précipitation moyenne annuelle. Les valeurs de ce coefficient sont reportées dans le tableau 4.

Tableau 4
 Coefficient multiplicateur des intensités de pluie en fonction de la hauteur pluviométrique moyenne annuelle (courbes intensités - durées - fréquences.)

Hauteur pluviométrique moyenne annuelle en mm	Coefficient multiplicateur des intensités
200	1,19
300	1,18
400	1,16
500	1,14
600	1,12
700	1,10
800	1,08
900	1,05
1000	1,02

Exemple : Pour une hauteur journalière de 40 mm, l'intensité en 25 mn est de 50 mm.h⁻¹ (fig.24). Pour une hauteur de pluie annuelle de 200 mm, l'intensité sera de 50 x 1,19 = 59,5 mm.h⁻¹, pour une pluviométrie annuelle de 700 mm, elle sera de 50 x 1,10 = 55,0 mm.h⁻¹.

Il ne faut, bien sûr, se faire aucune illusion sur la précision d'un tel schéma général, mais il permet d'obtenir un ordre de grandeur des intensités pour une durée et une récurrence données, en l'absence de valeurs plus précises dans la région étudiée.

L'agressivité des pluies

L'érosivité

Du fait du nombre important des composantes climatiques, il est pratique de disposer d'un indice unique qui reflète l'agressivité des pluies en un lieu donné. Un tel indice intéresse tout particulièrement les ingénieurs désireux d'évaluer les risques d'érosion dus au climat : l'érosivité. Parmi les indices testés depuis une quarantaine d'années, celui proposé par WISCHMEIER et SMITH (1958), est de loin le plus employé. On le calcule, averse par averse, à partir des enregistrements pluviographiques, en utilisant la relation:

$$R = I_{30}/100 \cdot Ec \cdot 1/1735,6$$

avec :

R : indice d'agressivité

I_{30} : intensité maximale pendant 30 minutes de l'averse, exprimée en mm.h^{-1} ,

E_c : énergie cinétique de l'averse, en Joules.m^{-2} .

Le coefficient 1735,6 permet de passer des unités du système international aux unités américaines qui expriment l'indice R.

Ainsi, l'érosivité dépend étroitement de deux facteurs : l'intensité et l'énergie cinétique. Les fortes intensités des pluies sahéliennes venant d'être présentées, il nous reste à évoquer leur énergie cinétique.

● **L'énergie cinétique des pluies**

Telle qu'elle apparaît dans la formule de R, l'énergie cinétique unitaire, E_{c_u} , correspondant à 1 mm de pluie, est calculée directement à partir de l'intensité de la pluie :

$$E_{c_u} = 11,9 + 8,73 \log I$$

avec :

E_{c_u} : énergie cinétique unitaire en $\text{Joules.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$

I : intensité de la pluie en mm.h^{-1} .

Or, si cette relation facilite considérablement l'estimation de l'énergie cinétique des pluies, elle ne doit être utilisée qu'avec circonspection. En effet, l'appliquer revient à admettre que sous tout climat, en toute saison, et pour tous les types de pluie, il existe une relation unique entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies, ou, en d'autres termes, que cette relation, établie aux Etats-Unis, est universelle.

Par définition : $E_c = 1/2 m \cdot v^2$

où : m : masse de la goutte, fonction de son diamètre,
 v^2 : vitesse d'impact en m.s^{-1} .

Après une chute d'une dizaine de mètres, toute goutte atteint une vitesse limite, due aux forces de frottement de l'air. La valeur de cette vitesse varie en fonction de son diamètre. Les relations établies par LAWS (1941) et par GUNN et KINZER (1949) permettent, en atmosphère calme, d'apprécier cette vitesse en fonction de la taille de la goutte.

Pour une pluie d'intensité donnée, il convient, en premier lieu, de déterminer la distribution des gouttes par classes de diamètre (photos n° 57 et n° 58).

On en retient, le plus souvent, le diamètre médian (D_{50}) pour lequel le volume des gouttes de diamètre supérieur est égal au volume des gouttes de diamètre inférieur. Ce diamètre varie avec l'intensité des pluies, ce qui justifie une relation du type $E_c = f(I)$, mais aussi en fonction de nombreux autres paramètres : à titre d'exemple, nous avons reporté sur la figure 25 l'évolution saisonnière de la relation $D_{50} = f(I)$, à Abidjan, pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1.800 mm (VALENTIN, 1984). Ce n'est qu'en juin, pendant les fortes pluies de mousson, que cette relation $D_{50} = f(I)$ se rapproche le plus de celle établie aux Etats-Unis (LAWS et PARSON, 1943) ; le reste de l'année, les gouttes de pluie sont de plus petite taille. A l'inverse, en s'éloignant de la côte atlantique, il semble que la taille des gouttes augmente : à Samaru, dans le nord du Nigéria, sous une pluviométrie annuelle moyenne de 1.100 mm, 60% des D_{50} excèdent 3 mm (KOWAL et KASSAM, 1976). Nous ne disposons pas, cependant,

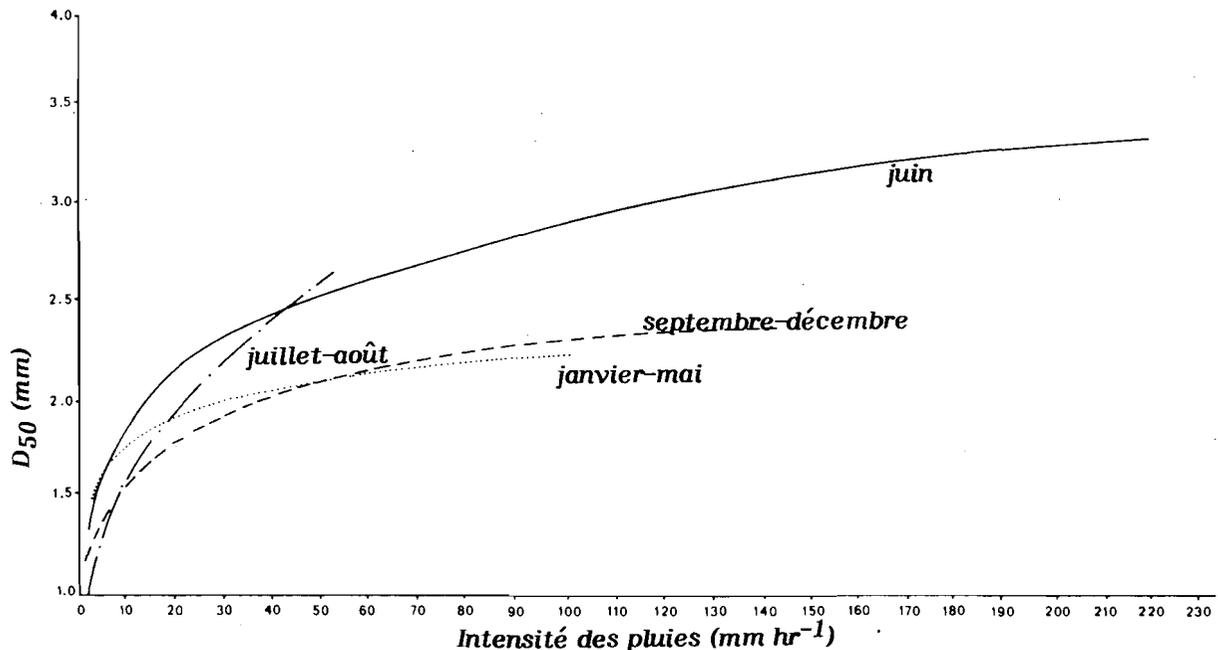


Figure 25.
 Evolution saisonnière de D_{50} à Abidjan.
 D'après VALENTIN (1984).

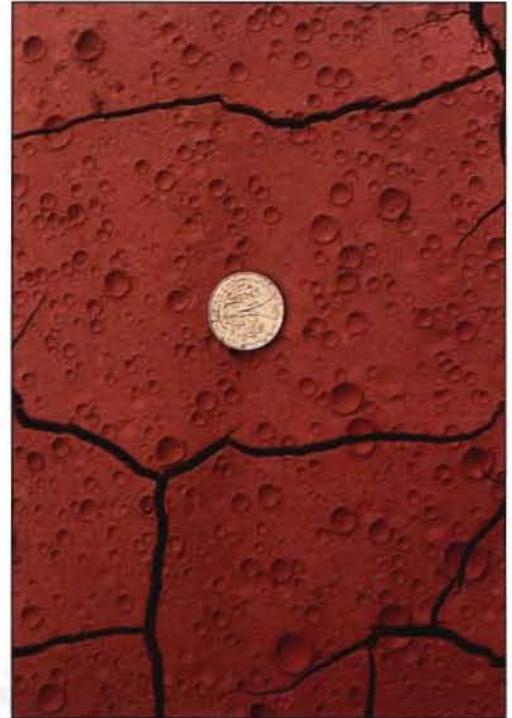


photo 57.
*Traces d'impact de gouttes, horizon B décapé,
région de N'Douci, Côte d'Ivoire.*
A noter : la variété de diamètre des gouttes et les fentes de retrait.



photo 58.
Impact des gouttes sous pluie simulée.
*A noter : les rejaillissements en fines gouttelettes
enrichies en argile.*



photo 59.
*Porosité d'origine faunique (termites)
au pied d'un arbuste,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*
*A noter : la destruction partielle
de la croûte structurale (ST2).*

de données sur la taille des gouttes de pluies au Sahel qui permettent de confirmer cette hypothèse.

Nous retiendrons néanmoins qu'en zone sahélienne, l'agressivité des précipitations est très élevée : elle résulte des fortes intensités, associées, très probablement, à des gouttes de grande taille. Même si l'on ne tient pas compte de cette source éventuelle d'aggravation, il n'en reste pas moins vrai que les valeurs estimées de R pour le Sahel excèdent de 5 à 10 fois celles de la zone tempérée (ROOSE, 1981). Et, pour une pluviométrie comparable, l'agressivité des pluies au Sahel excède de 50% celle du Nord-Est brésilien (LEPRUN, 1983).

L'irrigation

Composition des eaux d'irrigation

L'irrigation en zone aride pose divers problèmes au nombre desquels s'inscrit la qualité des eaux. L'apport d'eau riche en électrolytes favorise les processus de dispersion, la formation de croûte, ce qui entraîne la diminution de l'infiltrabilité des sols initialement pauvres en sodium ou en sels (AGASSI, MORIN et SHAINBERG, 1985 ; SIGALA, 1987).

Irrigation par aspersion;

Parmi les précautions à prendre lors de la mise en oeuvre d'une irrigation par aspersion, il ne faut négliger ni l'intensité, ni l'énergie cinétique des gouttes arrivant au sol. Alors qu'il s'agit d'une opération contrôlable, il est en effet regrettable, de perdre par ruissellement une partie de l'eau apportée du fait d'un mauvais choix de gicleurs ou d'une intensité d'aspersion trop élevée (VALENTIN et RUIZ FIGUEROA, 1987).

Irrigation gravitaire

De même, l'irrigation gravitaire peut favoriser parfois la formation de croûte, préjudiciable à l'utilisation optimale des eaux apportées (BISHAY et STOOPS, 1975). Une irrigation bien conduite doit prendre en compte ces risques de réorganisation superficielle par le contrôle de l'état structural initial, de l'état hydrique, de la qualité des eaux,...

L'état hydrique du sol

L'état hydrique initial

Le processus de désagrégation par éclatement est d'autant plus intense qu'il intervient sur un sol sec (HANKS, 1960 ; ROSE, 1961). En conséquence, pour un sol sensible à ce phénomène, le maintien d'une certaine humidité en surface (par paillage, ou par irrigation) limite les risques d'encroûtement. Il faut préciser également qu'un état initial proche de la saturation favorise les processus de dispersion, l'apparition du ruissellement et, de ce fait, la formation d'une croûte de ruissellement (BOIFFIN, PAPY et PEYRE, 1986).

La vitesse d'humectation

De même, une humectation brutale favorise l'emprisonnement de l'air contenu dans les agrégats et leur éclatement. Plus l'humectation est lente, plus les agrégats restent stables et les macropores ouverts (KELLER, 1967).

La vitesse de dessiccation

HILLEL (1960) et GERARD (1965) ont montré qu'une dessiccation rapide limite l'induration des croûtes.

L'histoire hydrique du sol

La sensibilité d'un sol à l'encroûtement dépend de son histoire hydrique, c'est-à-dire des cycles d'humectation et de dessiccation qu'il a subis. Ce sont les constituants organiques qui semblent les plus sensibles à cette histoire. En effet, pour les sols où la matière organique est le principal agent de stabilité, les agrégats prétraités au benzène résistent d'autant mieux à la désagrégation qu'ils ont été soumis à une période de sécheresse prolongée ; cette dessiccation favoriserait l'hydrophobie de la matière organique (SEBILLOTTE, 1968 ; MONNIER et KONAN, 1968 ; BOIFFIN, 1976 ; BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976).

Quant au rôle de l'histoire hydrique sur l'induration des croûtes, il dépend de leur aptitude à la fissuration. De nombreux cycles d'humectation et de dessiccation augmentent la résistance à la pénétration des croûtes sableuses, comme les croûtes de dessiccation (GIFFORD et THRAN, 1974). A l'inverse, pour les croûtes argileuses, comme les croûtes de décantation, les zones de fractures ont tendance à se multiplier (LEMONS et LUTZ, 1957 ; SHARMA et AGRAWAL, 1980).

Le vent

Le vent est un des facteurs conditionnels importants des états de surface par son rôle sur l'érosion, le transport et la sédimentation des particules sableuses (fig. 19) qui, en se déposant, peuvent totalement modifier un état de surface (dunes, placages ou jupes sableuses - photo n° 44).

Dans toute la zone sahélienne, on distingue deux types de vents dominants :

- L'un soufflant du nord-est et de l'est correspond à la période d'harmattan de novembre à avril.
- L'autre soufflant du sud-ouest et de l'ouest traduit le passage du flux d'air humide de la mousson de mai à octobre (fig. 26).

Les vitesses moyennes mensuelles et annuelles sont généralement assez faibles (2 à 4 m.s⁻¹). Le mois le plus venteux est presque toujours le mois de juin ou juillet. Les mois les plus calmes sont octobre et novembre, en fin de saison des pluies. Les vitesses moyennes mensuelles vont ensuite croissantes au fil de la saison sèche

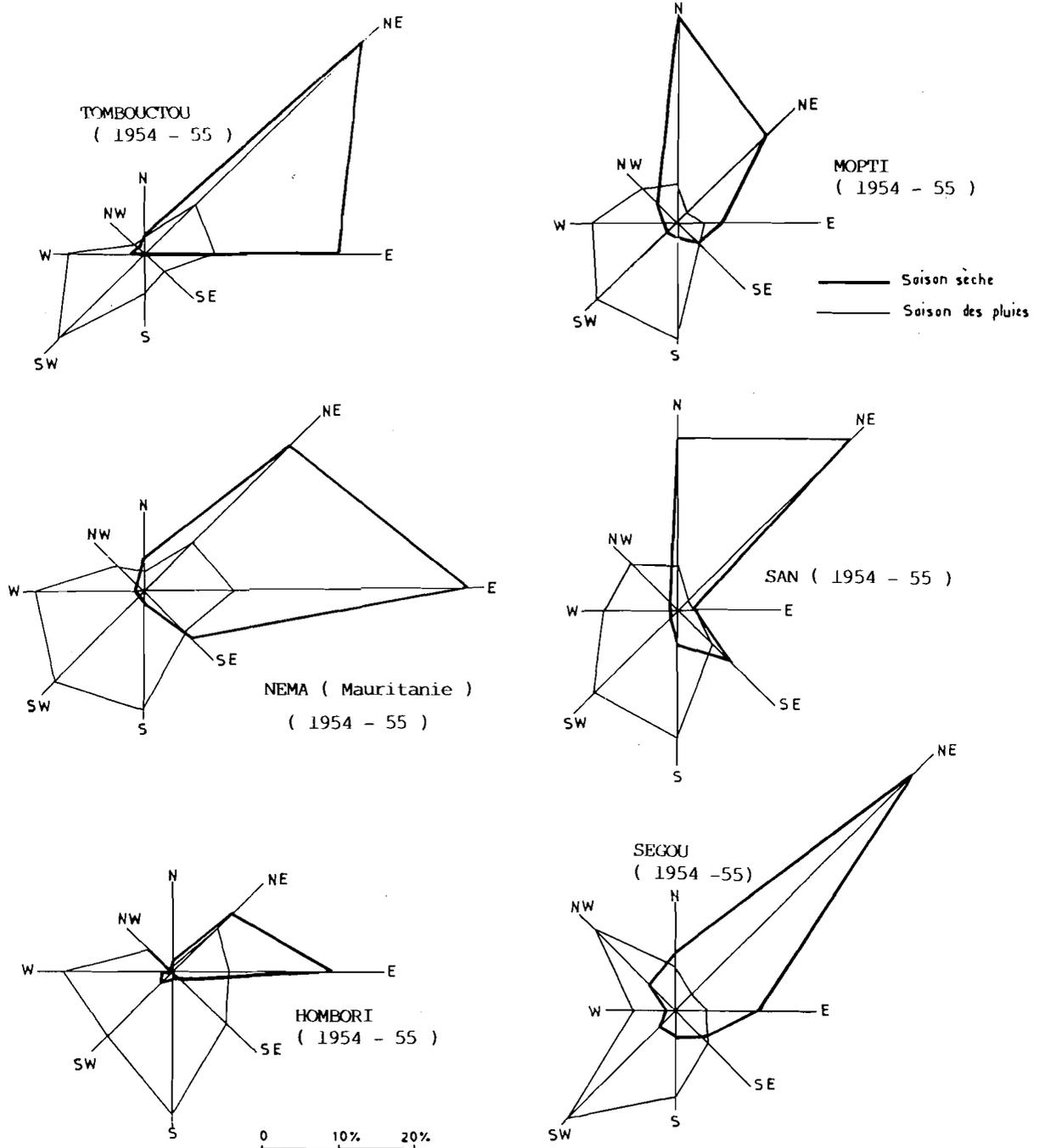


Figure 26.
Fréquence des directions des vents au Mali et en Mauritanie.
(D'après Monographie du Niger, BRUNET MORET et al. 1986)

jusqu'au maximum de juin. Les plus fortes valeurs instantanées s'enregistrent généralement en fin de saison sèche lorsque le sol dénudé présente la plus grande sensibilité à l'érosion éolienne. Elles se traduisent par les "vents de sable" qui précèdent les "tomades sèches", ou avec quelques pluies, du début de l'hivernage.

Le tableau 5 donne, pour des stations du Mali et de Mauritanie, un exemple du nombre de jours où des vents de diverses forces ont été mesurés à la fois en saisons sèche et pluvieuse.

Tableau 5
 Nombre de jours de vent
 en fonction de leur vitesse (en m.s⁻¹).
 Exemple de stations au Mali et en Mauritanie.

Saison sèche (novembre 1954-avril 1955)					
Stations	<1m.s ⁻¹	2 à 4	5 à 6	7 à 14	15 à 21
SEGOU	35j	95	39	12	0
SAN	43	124	9	3	0
MOPTI	63	69	29	19	0
TOMBOUCTOU	50	122	8	1	0
NEMA	22	49	17	90	1
HOMBORI	114	53	12	2	0

Saison des pluies (mai - octobre 1955)					
Stations	<1m.s ⁻¹	2 à 4	5 à 6	7 à 14	15 à 21
SEGOU	56j	106	17	5	0
SAN	61	100	14	7	0
MOPTI	65	64	33	20	1
TOMBOUCTOU	76	103	4	1	0
NEMA	30	93	23	38	0
HOMBORI	43	128	10	3	0

La couverture du sol

La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace de la surface du sol. En zone sahélienne, elle doit être considérée comme l'un des facteurs conditionnels essentiels des états de surface. N'intervient-elle pas vis-à-vis :

De la pluie, par :

- L'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.
- Le ruissellement le long des troncs ou des tiges. (le "stemflow" des anglosaxons) : l'eau qui n'est pas stockée ou évaporée au niveau du feuillage s'écoule le long des axes verticaux. Cet apport d'eau concentré, s'il est intense et survient sur un sol encroûté, peut favoriser un fort ruissellement, voire l'apparition de griffes d'érosion (DE PLOEY, 1983 ; HERWITZ 1986). Dans la région qui nous intéresse, ces mécanismes interviennent surtout au pied des arbres, accélérant ainsi leur déchaussement. Cet effet reste très limité ; en effet, la surface sous un couvert herbacé dense présente rarement un encroûtement important, sauf sur les sols argileux, mais plutôt une forte porosité d'origine faunique (photo n° 59).
- La dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve

alors modifiée puisque, d'une part la hauteur de chute dépend du dernier élément intercepteur (branche, feuille,...) et que, d'autre part, les gouttes interceptées subissent un nourrissage (elles augmentent de diamètre par coalescence). Ainsi l'expérience montre (RUIZ FIGUEROA et VALENTIN, 1983) que l'efficacité d'un couvert à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément intercepteur est bas. Pour un couvert à même le sol, comme un paillage de résidus, elle est maximale (énergie cinétique nulle). Dans le cas d'une moustiquaire tendue à 25 cm au-dessus d'une parcelle, l'énergie cinétique de la pluie se trouve divisée par 10. En revanche pour des hauteurs de chute supérieures à 10 m, le nourrissage des gouttes a tendance à compenser les pertes par interception nette et par ruissellement le long du tronc, de sorte que l'énergie cinétique d'une pluie au sol n'est guère modifiée par un couvert arboré (COLLINET et VALENTIN, 1979b). Dans ces conditions, on conçoit que le ruissellement et l'érosion puissent être supérieurs sous une forêt, débarrassée de son sous-bois et de sa litière, à ceux mesurés sur sol nu (CHAPMAN, 1948 ; WIERSUM, 1985).

Du ruissellement : les tiges, les troncs, les résidus végétaux et les racines affleurantes constituent autant d'obstacles au ruissellement (DE PLOEY, 1982). A défaut de le stopper (auquel cas se forment des croûtes de décantation), ces éléments ralentissent les écoulements superficiels.

Du vent : nul n'ignore le rôle de brise-vent joué par la végétation. De faibles variations de vitesse du vent suffisent à provoquer l'arrachement ou des dépôts de grains de sable (fig.19). Notons, une fois de plus, que c'est le type de couvert qui détermine l'effet du vent sur les états de surface. Un arbre isolé peut être source de turbulences et favoriser ainsi l'érosion éolienne à la base de son tronc, allant jusqu'au déchaussement de ses racines (LEPRUN, 1978). Alors qu'un fourré ou un couvert herbacé dense réduiront localement la vitesse du vent, entraînant le dépôt des sables, voire de graines.

De la faune : par son ombrage, le couvert et les résidus végétaux attirent la mésofaune (photos n° 59 et n° 60). Celle-ci, nous le verrons, induit, par son activité, des types de surfaces particuliers.

L'activité faunique

Les vers de terre

A Lamto, en Côte d'Ivoire, où il tombe 1.200 mm de pluie par an, LAVELLE (1983) a montré que sur les 700 m³ de terre ingérée par hectare et par an, les vers rejettent 30 à 40 m³ en surface. En termes d'hydrodynamique, un tel travail du sol présente des avantages multiples : la terre des rejets correspond à l'ouverture d'un volume comparable de pores à l'intérieur du sol ;

photo 60.
*Attraction des termites par les résidus végétaux,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
 A noter : les placages de termites
 au dessus de la croûte de dépôts éoliens,
 évoluée en ST3,
 et les pores d'origine faunique qui la traversent.*



photo 61.
*Lissages occasionnés par un labour peu profond,
 sur sol ferrugineux sableux,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



photo 62.
*Cordon pierreux isohypse,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



or, cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage rapide de l'eau. Enfin, et ce n'est pas là le moindre des effets du travail des vers, ils détruisent, au moins localement, les pellicules qui réduisent l'infiltration, en venant rejeter de la terre à la surface du sol. Malheureusement, ces animaux fort utiles résistent peu à la sécheresse. Comme nous l'avons déjà signalé dans la deuxième partie, en dessous de 1.000 mm de pluviométrie annuelle, leur habitat se concentre dans les zones humides : périphéries de mares, bordure des cours d'eau. Bien que souvent larges de quelques dizaines de mètres seulement, ces surfaces, noirâtres et riches en turricules (autre nom donné aux rejets) jouent un rôle dans l'alimentation des nappes: les eaux de ruissellement du versant se trouvent piégées dans ces "bandes d'arrêt" (VALENTIN, FRITSCH, PLANCHON, 1987) et s'infiltrent, au moins en début de saison des pluies. Comme, en outre, les vers craignent la lumière et recherchent, de ce fait, les zones enherbées, on comprend l'étroite corrélation qui existe entre la présence de nombreux turricules et une forte infiltrabilité (cf. 4^{ème} partie).

Les termites

En vue de procéder à leur récolte d'éléments végétaux, la plupart des termites font déboucher leurs galeries à la surface du sol, détruisent ainsi d'éventuelles pellicules et ouvrent une porosité fonctionnelle (qui assure une infiltration effective). Or, si ces pores, bien que larges de plusieurs millimètres, voire davantage, ne se repèrent pas aisément, les placages de récolte sont, en revanche, identifiables très facilement. Il s'agit de petits tunnels, sorte de manchons terreux, que les termites édifient autour des débris végétaux qu'ils récoltent, pour se prémunir de la lumière (photos n° 60 et n° 70).

Les systèmes de culture

Les successions et les associations de cultures

Dans le cas de la zone semi-aride de l'Afrique de l'ouest, il a été largement démontré (CHARREAU et TOURTE, 1967) que la succession ininterrompue de l'arachide entraîne de sérieux problèmes de dégradation structurale des sols sableux. Bien que d'un effet limité, l'introduction d'une jachère de longue durée tend à limiter les risques (QUANTIN et COMBEAU ; 1962). Plus efficace, l'association des cultures à un parc à *Acacia albida* Del. tend à assurer, outre le maintien d'une certaine fertilité chimique, des conditions physiques favorables (photos n° 38 et n° 133).

Les techniques culturales

Depuis une quarantaine d'années, voire davantage, de nombreuses recherches ont été entreprises dans le but de

déterminer les techniques culturales les mieux adaptées aux conditions de l'Afrique de l'ouest. Passons rapidement en revue les conclusions auxquelles ces travaux ont mené, en portant notre attention sur les principales règles à suivre en vue de la maîtrise des risques d'encroûtement :

● *Le travail profond*

Il existe deux grandes écoles. Pour l'une, le labour, qu'il soit à traction animale ou motorisé apparaît comme une opération indispensable à l'amélioration de l'infiltrabilité des sols (CHARREAU ET TOURTE, 1967 ; CHARREAU, 1969 ; CHARREAU et NICOU, 1971). Pour l'autre, il s'agit d'une technique dangereuse, peu adaptée aux sols tropicaux (LAL, 1976) MARTIN (1960), par exemple, considère le labour comme inadapté aux sols sableux du Nord-Cameroun. Tous s'accordent pour reconnaître que le labour doit être réalisé dans des conditions hydriques idéales, suffisamment humides pour diminuer la résistance du sol mais assez sèches pour limiter les risques de lissage et de tassement (photo n° 61). Force est d'admettre, toutefois, que, pour certains sols, la gamme d'humidité convenable s'avère très réduite, ce qui augmente les risques de dégradation des sols. Signalons également que la présence d'une semelle de labour, c'est-à-dire d'un niveau induré sous l'horizon travaillé, constitue un obstacle aussi bien pour l'enracinement que pour l'infiltration. Or, un drainage mal assuré de l'horizon ameubli peut accélérer la dégradation de la structure superficielle (BOIFFIN, 1984).

● *Le contrôle de l'état structural initial : les préparations superficielles*

Un lit de semences doit être constitué de mottes assez petites pour assurer le contact des graines avec la terre mais suffisamment grosses pour éviter d'être désagrégées trop rapidement sous les pluies (JOHNSON, MANNERING et MOLDENHAUER, 1979 ; BOIFFIN, 1984). Toutefois, pour les sols très instables, la taille des mottes ne suffit pas toujours à contrôler les problèmes d'encroûtement (VALENTIN et RUIZ FIGUEROA, 1987).

● *La rugosité*

Afin de ralentir ou de stopper le ruissellement, plusieurs techniques peuvent être préconisées, comme le billonnage isohypse, c'est-à-dire perpendiculaire au sens de la pente, le billonnage cloisonné, ou la mise en place de cordons pierreux (photo n° 62). Pour des gammes d'humidités, et d'intensités de pluie données, ces pratiques culturales peuvent être considérées, à juste titre, comme très efficaces contre le ruissellement. Il convient de souligner, cependant, qu'au-delà de ces seuils, elles se rangent, en revanche, parmi les préparations du sol les plus dangereuses en termes de ruisselle-

photo 63.
*Rupture de billons isohypses
 sous pluie simulée (simulateur type SWANSON)
 intense (120 mm h^{-1}),
 bassin versant de Galmi, Niger.*



photo 64.
*Reg désertique,
 bassin versant d'Agassaghas, Niger.
 A noter : deux surfaces élémentaires :
 le reg (croûte G) et les dépôts de décantation
 (croûte DEC)
 dans des zones d'endoréisme localisé.*



photo 65.
*Surfaces élémentaires d'une steppe :
 au premier plan, zone dénudée à croûte (type ERO),
 au second plan, zone enherbée,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



ment et d'érosion (COLLINET et LAFFORGUE, 1979 - photo n° 63).

● **Le paillage**

Le paillage ("mulching" en anglais) réduit à zéro l'énergie cinétique des pluies. Dès lors pourquoi ne pas en couvrir la totalité des champs du Sahel ? Ce serait méconnaître :

- L'interaction paillage-texture du sol : certes, le couvert assuré par des résidus de récolte limite les risques d'encroûtement et favorise considérablement l'infiltrabilité des sols sableux, prédominants dans cette région, mais l'efficacité de cette technique diminue lorsque le taux d'argile augmente (COLLINET et VALENTIN, 1985).
- La forte demande en paille pour l'édification des toitures et l'alimentation du bétail en saison sèche.
- Les risques d'enherbement qui y sont souvent associés.

● **L'enfouissement des résidus de récolte**

Une autre méthode de gestion des résidus est souvent préconisée; il s'agit de leur enfouissement. Comme celui-ci n'est jamais total, certains résidus émergent du sol, et favorisent ainsi l'apparition de discontinuités,

défavorables à la formation d'une croûte continue. Dans les conditions semi-arides, outre les problèmes évoqués pour le paillage, il convient de mentionner ceux liés à la toxicité des résidus (GANRY et BERTHEAU, 1982).

● **Conclusion**

En fait, il n'existe pas de solution unique à ce problème de choix des techniques culturales. A l'évidence, chaque cas doit être étudié en fonction non seulement des contraintes d'ordre physique comme la distribution des pluies, la granulométrie et la profondeur du sol, mais encore des contraintes d'ordre économique et social : stratégie de production, ressources et disponibilité en main d'œuvre, en matériel, en énergie,... Doit-on rappeler que dans le domaine agronomique, rares sont les décisions qui ne répondent qu'à un objectif unique ? A cet égard, le contrôle de l'encroûtement et du ruissellement ne peut être considéré que comme l'un des éléments d'un système plus vaste. Ne considérer que le point de vue de la protection des sols, sans tenir compte des systèmes de production serait nier l'approche agronomique qui ne peut être que globale.

LES SURFACES ÉLÉMENTAIRES

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'APPROCHE

INTRODUCTION

Telle qu'elle a été définie (cf. Introduction, §3), la *surface élémentaire* intègre le couvert végétal, la surface du sol et les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations. Ces dernières, nous venons de le voir, résultent de mécanismes ou d'interventions, propres à cette zone du sol : action de la pluie, du ruissellement, du vent, activité de récolte de la mésofaune, travail du sol...

Comment utiliser ce concept d'une manière à la fois scientifique et opérationnelle ? L'expérience acquise ces dernières années nous incite à penser qu'un tel objectif peut être atteint, pour peu que l'on prenne soin :

- de préciser les niveaux d'observation,
- de définir un canevas de description qui permette une normalisation de la saisie des données,
- d'élaborer un référentiel des principales surfaces élémentaires, afin de faciliter la structuration des connaissances.

LES NIVEAUX D'OBSERVATION : LES CONCEPTS DE SURFACE ÉLÉMENTAIRE ET D'ÉTAT DE SURFACE

Dès qu'il s'agit de caractériser des états de surface, se pose le problème de l'échelle d'étude : région, petit bassin versant, parcelles cultivées, échantillon... et des techniques employées : dispose-t-on d'images satellitaires, de photographies aériennes, de relevés de terrain, ou de lames minces ? C'est dire combien il est nécessaire, dès à présent, de préciser le niveau que nous privilégierons ici. Ce sera l'observation de terrain. Elle s'impose, en effet, par :

- Sa primauté sur les autres échelles d'analyse : pour intéressantes qu'elles soient, celles-ci ne sauraient être dissociées des descriptions au champ. Seule cette "vérité-terrain" assure, en effet, le fondement scientifique des études entreprises à partir de photographies aériennes ou de données satellitaires qui, sans elle, se limiteraient à de simples interprétations. De même, l'analyse micromorphologique n'est riche d'enseignements que si l'échantillon étudié peut-être situé avec précision dans son environnement.
- Sa simplicité : la description d'un état de surface ne fait pas appel à un sens de l'observation hors du commun, ni à un matériel sophistiqué.

Du fait de son hétérogénéité, la surface du sol donne,

à première vue, une impression de complexité. Cependant, un examen plus attentif permet de la décomposer en surfaces homogènes. Nous utiliserons, pour les désigner, le terme de "*surfaces élémentaires*". Leur nature, leur nombre et leurs dimensions peuvent considérablement varier selon les milieux. Donnons trois exemples :

- Une plaine désertique, couverte d'un pavage caillouteux ("un reg"- photo n° 64) peut être considérée comme une seule surface élémentaire, même si elle couvre plusieurs km².
- Une steppe est constituée d'un tapis graminéen discontinu. Elle comprend donc au moins deux surfaces élémentaires : les zones enherbées qui alternent avec des taches dépourvues de végétation et couvertes de croûtes (photo n° 65).

Chaque parcelle d'un champ constitue une surface élémentaire dans la mesure où elle caractérise un traitement particulier (photo n° 66). Ainsi, un *état de surface* peut correspondre tout aussi bien :

- à une seule surface élémentaire,
- à la juxtaposition de plusieurs,
- ou à un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire à un ensemble d'éléments identifiés, ici les surfaces élémentaires, au sein duquel jouent des interactions. Nous verrons plus loin que tel est le cas de nombreux états de surface naturels, de sorte que les surfaces élémentaires peuvent être non seulement juxtaposées mais interdépendantes. Nous aborderons le problème des limites et des relations entre surfaces élémentaires lorsque nous traiterons de l'approche cartographique (5^{ème} partie).

LES CONDITIONS D'OBSERVATION

Il est nécessaire de réunir plusieurs conditions pour acquérir des données de terrain qui soient fiables et exploitables. Elles doivent être :

Aussi exhaustives que possible. Il y a lieu d'inclure des observations qui ne paraissent pas d'emblée indispensables pour l'étude en cours. Certaines variables considérées, *a priori* comme mineures, peuvent en effet se révéler par la suite essentielles à la caractérisation du milieu, au cours des dépouillements, lors de synthèses ultérieures ou pour des collègues d'une autre discipline.

- **Objectives.** Il convient, d'abord, de s'en tenir aux faits, puis d'éviter de passer du mode descriptif au mode interprétatif.

- **Précises.** L'acquisition des données, nous le verrons plus loin, fait largement appel à des estimations visuelles de recouvrement. Or, l'expérience montre qu'une personne non avertie surestime souvent ces pourcentages, car elle est influencée plus par le nombre et la forme des éléments observés que par la surface qu'ils occupent réellement. D'où l'intérêt pour l'observateur d'étalonner son échelle personnelle d'évaluation à partir d'exemples connus. A cet effet, le lecteur pourra se reporter aux planches présentées en annexe.
- **Fidèles.** Cet étalonnage peut subir une dérive au cours du temps imputable à la lassitude, ou à

l'influence exercée par les descriptions les plus récentes. De ce fait, il est impératif de réétalonner fréquemment son échelle d'évaluation, quitte à revenir sur un terrain déjà décrit.

- **Normalisées.** Une démarche scientifique exige l'utilisation de normes. Celles-ci imposent une discipline intellectuelle et un langage commun, sans lesquels toute possibilité d'échanges et de critiques est exclue. Dans cette perspective, une grille de description, associée à un glossaire, constituent des outils précieux que se propose de fournir cet ouvrage.

DESCRIPTION DE LA SURFACE ÉLÉMENTAIRE

INTRODUCTION

Nous venons de souligner l'intérêt d'effectuer des relevés aussi exhaustifs que le permettent les conditions d'étude. Toutefois, il faut bien admettre que nul ne peut prétendre mener, avec une égale compétence, des études d'écologie végétale, de zoologie et de pédologie. Face à cette difficulté, il convient d'emprunter à ces diverses disciplines les techniques les mieux adaptées à notre objectif : relier les composantes de l'environnement à la dynamique de l'eau. Pour cela, nous allons sélectionner, parmi les glossaires de description déjà existants, les critères les plus pertinents. Nous nous référerons essentiellement aux ouvrages édités par l'Agence de Coopération Culturelle et Technique (A.C.C.T., 1978a et b) et par DAGET et GODRON (1979) qui ont déjà fortement contribué à une normalisation des termes utilisés dans le monde francophone pour la description de l'environnement pédologique tropical. Présumer de la hiérarchie des critères à prendre en compte peut être hasardeux. Toutefois, certaines contingences viennent parfois réduire le temps disponible pour les relevés, contrariant dès lors toute tentative de description exhaustive. Dans ces conditions, il est intéressant de disposer d'une liste abrégée des variables indispensables. Ce canevas minimum a été défini à partir des analyses statistiques qui ont permis de déterminer l'importance relative des différents paramètres du milieu sur l'infiltrabilité des sols de la zone aride ouest africaine, mesurée à l'échelle du m² (ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1986).

LE COUVERT HERBACÉ OU CULTURAL

Quitte à revenir plus loin sur une approche plus globale du couvert végétal, nous allons établir, dès à présent, une distinction nette entre couvert arboré et couvert herbacé (ou cultural). Un tel point de vue se justifie autant par l'expérience acquise, que par des questions d'échelle : à celle de la surface élémentaire, telle que nous l'avons abordée sur des parcelles d'un m², ce sont, en effet, les composantes du couvert herbacé qui dominent. A des niveaux plus élevés de complexité, la distribution latérale du couvert ligneux revêt, en revanche, une importance primordiale, notamment lors des travaux de cartographie. Aussi les critères à prendre alors en compte seront abordés dans la cinquième partie de cet ouvrage.

Pour le couvert herbacé, ou cultural, il importe d'estimer le *recouvrement total* qui comprend le recouvrement assuré par l'ensemble des parties aériennes et par les résidus végétaux, à l'exclusion des algues, lichens et mousses qui poussent directement à la surface du sol. Son complément à 100 représente le pourcentage de sol nu, directement exposé à l'impact des pluies.

Cette estimation visuelle du pourcentage de recouvrement constitue une opération essentielle de la description des surfaces élémentaires. Une personne inexpérimentée devra nécessairement s'aider des planches présentées en annexe. Dans le cas des forts recouvrements herbacés, il est recommandé d'évaluer d'abord le pourcentage occupé par les surfaces nues et d'en déduire ensuite celui des surfaces couvertes.



photo 66.
*Surfaces élémentaires correspondant
à plusieurs stades du cycle cultural
du maïs irrigué,
bordure du lac de Bam, Burkina Faso.*



photo 67.
*Microrelief en gilgai sur vertisol,
bassin versant de Mouda, Cameroun.*

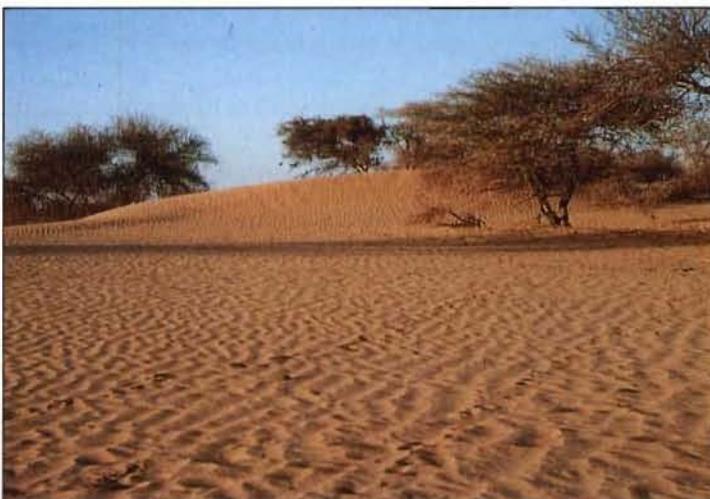


photo 68.
*Microrides d'éolisation,
cuvette d'Agadez, Niger.*

LE MICRORELIEF

Parmi les caractères propres à la surface du sol, nous nous intéresserons plus particulièrement au microrelief, à l'activité mésofaunique et aux organisations pédologiques superficielles.

A l'échelle de la surface élémentaire, ce sont les petits accidents du terrain, naturels ou induits par les techniques culturales, qui doivent être relevés. Ce sont eux qui confèrent au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau (encore appelé "détention superficielle"). Nous distinguons :

- le **mésorelief** qui concerne les modelés d'amplitude supérieure à 50 cm,
- le **microrelief** : amplitude comprise entre 5 et 50 cm, par exemple le relief "gilgai" de certains vertisols (photo n° 67), à savoir "en buttes, lié à l'alternance des phases humides et sèches dans les sols à argiles gonflantes" (A.C.C.T, 1978a), et les microrides d'éolisation (photo n° 68),
- le **nanorelief** : amplitude inférieure à 5 cm.

Nous nous limitons ici à l'exposé des critères minimaux du microrelief ; les autres formes du relief étant abordées lors de la cinquième partie.

- Hauteur (ou profondeur), en cm.
- Degré d'obstruction : il peut être nul, faible, moyen ou fort. Il s'évalue en fonction de la continuité de l'obstacle considéré et de l'angle qu'il forme avec la pente. Il est, par exemple, maximal pour des billons cloisonnés, encore très fort pour des billons isohypses (perpendiculaires au sens de la pente - photo n° 63).

LES CONSTRUCTIONS DE LA MÉSOFAUNE

Plus que l'activité faunique proprement dite, c'est la porosité qu'elle génère qui nous intéresse ici. Comme indices, nous utilisons les constructions de la mésofaune : nous relevons ainsi le pourcentage de surface occupée par les :

- Turricules de vers : il s'agit des déjections de vers à la surface du sol (photo n° 69).
- Placages de termites : ce sont les petits chenaux de terre que construisent les termites à la surface du sol pour se prémunir de la lumière lors de leur activité de récolte (photo n° 70).
- Fourmillières (photo n° 36).

LES MICROHORIZONS

Définitions

Il convient, en premier lieu, de préciser l'objet que nous allons maintenant prendre en compte : il ne s'agit

ni du sol dans sa globalité, ni même de son horizon superficiel, mais de sa surface, considérée sur une certaine épaisseur. Afin d'éviter toute confusion avec l'horizon A, nous désignerons ces organisations par les termes de *microorganisations pelliculaires superficielles*, ou de *croûtes*. Celles-ci sont constituées de *microhorizons*, observés sur des *microprofils*.

- **Microorganisations pelliculaires superficielles (= Croûtes)**

Ce terme désigne la partie supérieure du sol, finement stratifiée, qui a subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques ou anthropiques ; en abrégé : *mops* (photo n° 71).

- **Microhorizons**

Différenciations pédologiques très peu épaisses, de l'ordre du millimètre, plus ou moins parallèles à la surface du sol.

- **Microprofil**

Superposition de plusieurs microhorizons observés sur une coupe.

- **Remarques**

Partie intégrante du sol, les mops présentent les caractères propres à toute organisation pédologique de sorte qu'elles s'étudient dans les quatre dimensions :

- Bien que de faible épaisseur, elles se caractérisent par une **différenciation verticale**. Comme nous l'avons déjà montré (chapitre 11, §2), les microhorizons peuvent se transformer par départ ou apport de constituants, et de ce fait être reliés génétiquement.
- Les mops présentent également une **organisation latérale** : la nature des microhorizons varie dans l'espace en fonction des facteurs du milieu.
- Elles subissent des **transformations dans le temps**. Il s'agit d'un milieu dynamique.

La profondeur du microprofil dépend du degré de développement des organisations spécifiques de la surface. La plupart du temps, elle n'excède pas quelques millimètres, mais, occasionnellement, son examen réclame l'ouverture d'une petite fosse d'une dizaine de centimètres, voire plus profonde. Tel est le cas, par exemple, des microdunes.

Plusieurs aspects confèrent à cette zone du sol une forte **originalité** :

- Elle constitue le niveau pédologique directement soumis aux conditions météorologiques. De ce fait, elle est le siège de contraintes supérieures à celles du milieu sous-jacent qui est plus tamponné : écarts thermiques, hyperdessiccation ou sursaturation, impact des pluies, effet du vent.
- Elle n'est soumise à aucune pression exercée par les horizons supérieurs ("pression pédostatique"). Il s'ensuit des possibilités de :
 - variations de volume nettement plus marquées,



photo 69.
Rejets de vers de terres ("turricules"),
Parc National de la Comoé, Côte d'Ivoire.



photo 70.
Placages de termites,
région de la mare d'Oursi, Burkina Faso.



photo 71.
Microorganisation pelliculaire superficielle,
constituée de trois microhorizons :
un microhorizon de sable grossier discontinu
surmontant un microhorizon de sable fin continu
reposant sur une pellicule plasmique continue,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : les microrides d'éolisation.

notamment lors des cycles d'humectation et de dessiccation,

- transferts de constituants vers le haut, par exemple sous l'effet du rejaillissement.
- Alors que la formation des sols résulte principalement de processus géochimiques lents, ce sont des mécanismes physiques rapides qui prédominent lors de l'édification des microhorizons à la surface du sol.

Comme on le voit, la surface du sol présente une forte particularité, mais, somme toute, d'autres zones du sol offrent une originalité comparable, tels le front d'altération ou la zone de pédoplasmation*. Pourquoi dès lors y consacrer une étude spécifique, distincte de celle du sol ? C'est à cette question que nous allons nous efforcer de répondre :

- En premier lieu, il importe de rappeler que les constituants d'un sol ont deux origines bien distinctes : ou bien ils dérivent de l'altération du matériau sous-jacent, ou bien ils résultent d'apports. Ceux-ci, qu'ils soient dus au vent, à la pluie, ou au ruissellement, (voire aux volcans), de nature organique ou minérale, transitent nécessairement par la surface du sol. En sorte que celle-ci s'enrichit en matériaux étrangers à la roche et au sol sous-jacents (exemple : des microdunes éoliennes qui recouvrent un sol argileux). D'où une possible indépendance entre les croûtes et le sol, d'autant plus manifeste que la région concernée constitue une zone d'apports. Pour désigner ces mops, allochtones* par rapport au sol sous-jacent, certains pédologues ont utilisé le terme d'"*horizon de transit*" (BOCQUIER, 1968). Ces discordances peuvent être à la fois
 - *verticales* : la nature et la granulométrie des matériaux de surface diffèrent alors de ceux du sol,
 - *latérales* : les limites cartographiques entre les horizons du sol et les microhorizons superficiels se recourent.
- Ensuite, force est d'admettre que la plupart des travaux pédologiques ne rendent pas compte des organisations de surface. Les classifications des sols, fondées sur la pédogenèse et la morphologie des horizons profonds, pour utiles qu'elles soient, ne reflètent pas nécessairement les conditions actuelles du milieu : "elles s'efforcent de prendre pour base les caractères intrinsèques des sols ; elles éliminent, dans la mesure du possible, les conditions écologiques qui président à leur évolution" (DUCHAUFOR, 1970). Il ne peut en être autrement : une carte pédologique se doit, en effet, de représenter les caractères généraux et permanents des sols pour intéresser les utilisateurs les plus divers : des agronomes, des ingénieurs des travaux publics, voire des militaires du génie... Enfin, et c'est là le point le plus important, l'expérience

enseigne qu'en zone sahélienne, c'est la caractérisation des organisations pelliculaires superficielles, plus que celle des sols qui permet la meilleure prédiction de phénomènes aussi importants que l'infiltration, l'érosion hydrique, la déflation, et la levée des semences (COLLINET et LAFFORGUE 1979 ; COLLINET et VALENTIN, 1979 ; VALENTIN, 1981 ; ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1986 ;...). Dans cette perspective, bon nombre d'auteurs considèrent qu'une étude pédologique doit nécessairement prendre en compte les organisations de surface, particulièrement en zone aride (CHEVALLIER et al., 1985 ; HOOGMOED, 1986 ; VALENTIN, 1985a ; SEGUI, 1986 ; ALBERGEL, 1987b ;...).

Les critères de description

L'analyse des différents caractères des microhorizons permet d'établir des relations entre leur morphologie et leur comportement. Cette phase de description revêt une importance primordiale : elle permet de réunir les données de base auxquelles il sera toujours possible de se référer, en cas d'hésitation ou d'erreur, lors des synthèses ultérieures.

La faible épaisseur de certains microhorizons peut en rendre l'examen délicat. De sorte qu'il s'avère parfois nécessaire de prélever des échantillons, de les consolider en les imprégnant dans de la résine, et de confectionner des lames minces que l'on observe sous microscope (BREWER, 1964 ; BLIC, 1979 - photo n° 72). Est-ce à dire qu'il faut laisser cette caractérisation fine à des spécialistes (les micromorphologistes) ? Loin s'en faut : l'approche de terrain suffit, le plus souvent, à fournir les données essentielles à notre objectif. C'est pourquoi, nous ne ferons appel, par la suite, qu'à des techniques de description simples et éprouvées. Pour le vocabulaire, nous nous référons aux glossaires déjà mentionnés (A.C.C.T, 1978a ; MIGNIEN, 1980), en les adaptant, le cas échéant, aux conditions spécifiques de la surface du sol. Quant à l'équipement, c'est celui du pédologue : couteau, mètre, loupe, pinceau. Précisons que les croûtes doivent être examinées à l'état sec. Au cours de la saison des pluies, il est en effet malaisé de distinguer les limites entre organisations.

Un microhorizon se définit premièrement par ses limites considérées dans les trois dimensions. A cet effet, il est nécessaire de prendre en compte les critères suivants :

● *Profondeur et épaisseur* :

Les profondeurs d'apparition des microhorizons se mesurent à partir de la surface, quelle qu'en soit la nature. Autrement dit, lorsqu'un paillage couvre le sol, la cote zéro correspond au sommet de ce premier

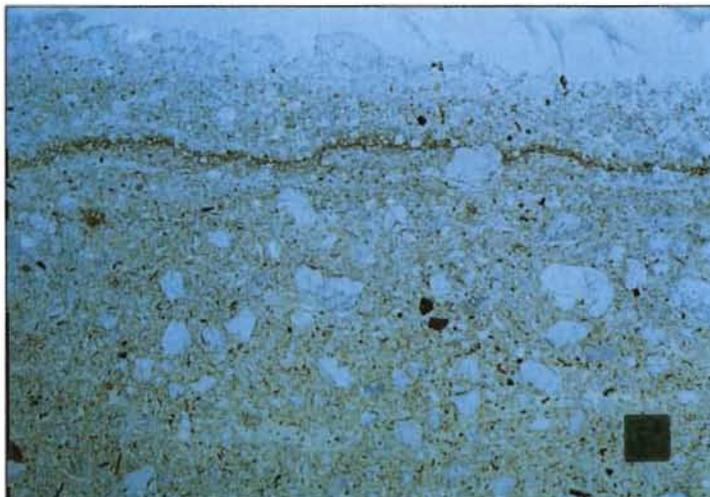


photo 72.
 Microphotographie de lame mince
 de croûte structurale (ST3), sol alluvial sableux,
 cuvette d'Agadez, Niger.
 Côté du carré noir en bas à droite : 5 mm.



photo 73.
 Croûte polygénique de dépôts éoliens (EOL)
 sur microbutte sableuse, Revane, Ferlo, Sénégal.

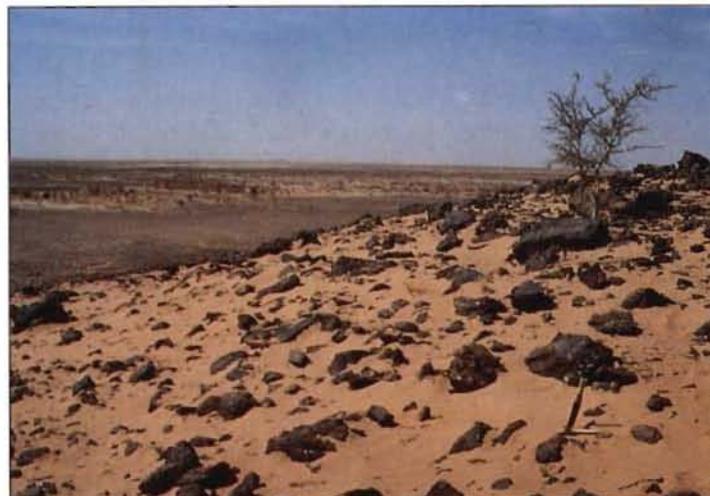


photo 74.
 Surface à sable fin libre,
 avec 5% de blocs, 15% de pierres, 5% de cailloux
 (croûte de dépôts éoliens, EOL),
 bassin versant de Tin Adjar, Mali.

microhorizon organique. Profondeur et épaisseur se mesurent au demi-millimètre près : <0,5 mm, entre 0,5 et 1 mm, ... Avec quelque expérience, et à l'aide de la loupe, il est possible d'évaluer des épaisseurs de l'ordre du dixième de millimètre, c'est-à-dire de celles des feuilles d'un livre. Si la transition avec le microhorizon suivant n'est pas nette, on relève la limite située à mi-hauteur de la transition.

L'épaisseur d'un microhorizon peut varier de quelques dixièmes à plusieurs dizaines de millimètres. A défaut de mesures plus précises, on utilise l'échelle de notation qualitative ordonnée suivante :

- 0 : absence,
- 1: pellicule peu individualisée (bien inférieure à 0,5 mm),
- 2 : de l'ordre de 0,5 mm,
- 3 : > 0,5 mm.

Ajoutons que des traitements statistiques ont confirmé la validité de cette échelle quant à l'aptitude au ruisellement (ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1986).

● *Polygénie* (photos n° 73, n° 98 et n° 100)

Des microhorizons présentent parfois une certaine périodicité : ce peut être par exemple la répétition, sur plusieurs centimètres, d'un couple microhorizon sableux-pellicule plasmique. Il convient alors de décrire avec précision chaque type de microhorizon puis d'en compter le nombre de répétitions verticales, en notant la profondeur atteinte par le dernier ainsi que les variations éventuelles d'une répétition à l'autre (changement d'épaisseur, de porosité,...).

● *Régularité*

Ce paramètre permet d'estimer la conformité des limites supérieure et inférieure du microhorizon avec la surface topographique. Ainsi, elles peuvent être :

- régulières, c'est-à-dire parallèles à la surface,
- ondulées, lorsque la limite dessine des sinuosités plus larges que profondes,
- irrégulières, pour des sinuosités plus profondes que larges,
- obliques, la limite inférieure, rectiligne, forme un angle avec la surface. Le microhorizon est alors "en biseau".

● *Netteté de la transition*

Pour décrire la netteté de la transition entre deux microhorizons, on dispose de cinq adjectifs :

- abrupte : pour un contact direct,
- nette : la transition est inférieure à 0,5 mm,
- distincte : transition de 0,5 à 1 mm,
- graduelle : transition de 1mm à 10 mm,
- progressive : transition supérieure à 10 mm.

Il y a lieu de porter attention également au degré d'adhérence entre la base du micro-profil et le sommet

du premier horizon non réorganisé. Outre les adjectifs qui viennent d'être cités, peuvent être employés :

- indépendant : le dernier microhorizon, par exemple constitué de sables grossiers, n'adhère pas à l'horizon sous-jacent ; il suffit de souffler dessus pour les séparer,
- faiblement adhérent : le pinceau est nécessaire pour provoquer la disjonction,
- solidaire : le dernier microhorizon adhère très fortement au premier horizon ; tel est souvent le cas des pellicules plasmiques d'érosion (cf. définition plus loin).

● *Continuité et affleurement*

Les caractères précédents décrivent, dans le sens vertical, les limites des microhorizons. Or, pour les surfaces, les limites latérales revêtent une importance au moins aussi grande. D'où la nécessité de préciser pour chaque microhorizon :

- la continuité : elle s'exprime en pourcentage de surface occupée par la projection verticale du microhorizon considéré (estimation visuelle). En cela, elle s'apparente à un recouvrement,
- l'affleurement : c'est la part de surface (%) qui correspond à la zone d'affleurement du microhorizon. Pour les microhorizons peu perméables, ce caractère revêt, bien sûr, une importance majeure.

Outre, ces données quantitatives, il est intéressant de noter les discontinuités communes à plusieurs microhorizons, comme par exemple, l'entaille due à une protogriffe*. Ce faisant, on définit les relations entre limites verticale et horizontale.

● *La couleur*

Relever la couleur d'un horizon s'avère très utile en pédologie : c'est, en effet, un indice de teneur en matière organique (noire) ou en oxydes de fer peu hydratés (rouge). Encore que certaines précautions s'imposent tant peut varier l'estimation d'une couleur d'une personne à l'autre. D'où l'utilisation par les pédologues d'un code international de référence (Code Munsell). Pour les microhorizons, l'idéal, bien sûr, consiste à utiliser ce code, mais son prix élevé peut constituer un handicap à son emploi systématique. A défaut, nous suggérons de noter pour chaque microhorizon :

- la couleur principale : noir, gris, brun, rouge, rose, blanc, jaune, olive, vert,
- la teinte : très foncée, foncée, claire, rougeâtre, jaunâtre, bleuâtre,...

● *La taille des constituants* :

Comme nous le verrons plus loin, c'est sur la taille des constituants que se fonde l'identification des types de microhorizons. Or, en raison de la faible épaisseur de certains d'entre eux, il est parfois difficile d'en



photo 75.
Structure prismatique, dépôts argileux à l'amont
d'un barrage à sec,
croûte de décantation (DEC),
cuvette d'Agadez, Niger.



photo 76.
Structure en plaquettes, dépôts limoneux,
croûte de décantation (DEC),
bassin versant de Tin Adjar, Mali.
A noter : la corrosion des plaquettes.



photo 77.
Structure en plaquettes rebroussées,
croûte de décantation (DEC),
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : les placages de récolte de termites
au-dessus de la croûte et les algues noirâtres
qui la consolident.

apprécier la texture. Rappelons que celle-ci est l'estimation tactile à l'état humide de la composition granulométrique de la terre fine (inférieure à 2 mm). Pour pallier cette difficulté, seules sont prises en compte les classes de taille susceptibles d'être différenciées sur le terrain sans ambiguïté :

- **Le plasma** : ce terme, emprunté à la micromorphologie, désigne la fraction qui inclut tous les matériaux minéraux et organiques de dimensions colloïdales et toute la fraction soluble, qui ne font pas partie des grains de squelette (BREWER, 1964). Nous l'utilisons ici pour un matériau qui semble, à l'œil nu, dépourvu de grains de sables. Toutefois, quand les conditions le permettent, on s'efforce de distinguer :

- L'argile : à l'état humide (que l'on obtient en humectant l'échantillon avec l'eau d'une pissette, ou à défaut avec de la salive), elle colle et salit fortement les doigts. C'est la fraction inférieure à 2 microns.
- Le limon : cette fraction est comprise entre 2 et 50 microns. A l'état humide, la pâte qu'il forme ne colle pas les doigts. A l'état sec, il se reconnaît aisément à son toucher doux qui évoque le talc.
- **Le sable fin** : lorsqu'il est propre (on dit "lavé"), il se reconnaît facilement visuellement (fraction 50-200 microns). Teinté par de la matière organique, du limon ou de l'argile, on l'entend crisser sous les doigts en portant l'échantillon à l'oreille.
- **Le sable grossier** : c'est la fraction comprise entre 0,2 et 2 mm que l'on identifie sans difficulté à l'œil nu.

Les fractions granulométriques précédentes constituent ce qu'il est convenu d'appeler la terre fine. Au même titre, doivent être considérés les éléments grossiers supérieurs à 2 mm ("la charge grossière"). Souvent discontinus, ces microhorizons grossiers se différencient par la taille de leurs constituants. C'est ainsi que l'on distingue, en fonction de leur diamètre moyen :

- les graviers (ou gravillons, s'il s'agit de nodules ferrugineux) : de 2 à 20 mm,
- les cailloux : de 20 à 75 mm,
- les pierres : de 75 à 200 mm,
- les blocs : >200 mm.

Pratiquement, on caractérise chaque microhorizon selon sa classe granulométrique dominante :

- plasmique, en précisant, le cas échéant, argileux ou limoneux,
- à sable fin,
- à sable grossier,
- graveleux, ou gravillonnaire,
- caillouteux,
- pierreux,
- à blocs.

Dans la mesure du possible, on évalue le pourcentage de chaque fraction. Donnons trois exemples :

- "microhorizon caillouteux", avec 70% de cailloux et 30% de graviers,
- "microhorizon à sable grossier" avec 60 % de sable grossier, 30 % de gravillons et 10% de sable fin.
- "microhorizon à sable fin" avec 5% de blocs, 15% de pierres, 5% de cailloux (photo n° 74).

Pour les microhorizons sableux, il importe de préciser si les grains de quartz sont propres, auquel cas on les dit "lavés", ou bien enrobés de terre fine, ou imprégnés d'hydroxydes de fer. Quant aux pellicules plasmiques, on s'assure que la couleur noire ou verte n'est pas induite par des algues, des lichens, ou des mousses, microorganismes qui présentent un aspect particulier.

- **La nature des constituants** :

C'est la taille des constituants qui détermine, en premier lieu, les propriétés hydrodynamiques d'un microhorizon. Néanmoins, la prise en compte de leur nature s'avère tout aussi importante.

Tout d'abord, elle peut renseigner sur la stabilité de la structure : l'affleurement d'un niveau calcaire, sous forme de dalles, ou de débris coquilliers (photo n° 104), contribue, le plus souvent, au développement d'agrégats peu sujets aux réorganisations et donc à une infiltrabilité élevée. Inversement, des efflorescences salines indiquent une forte instabilité de la structure. Afin de déceler la présence de calcaire, il est bon de se munir d'une fiole contenant de l'acide chlorhydrique : en présence de carbonate de calcium, il fait effervescence. A défaut, on peut avoir recours à de "l'eau" de batterie. De même, lorsque l'on suspecte la présence de sels, le plus simple consiste à prélever un échantillon et à le goûter.

Ensuite, l'étude de la nature des constituants peut être riche d'enseignements quant aux relations surface-sol-roche : selon la similitude minéralogique avec le substrat géologique, sol et surface peuvent être considérés comme *autochtones**, c'est-à-dire formés sur place, ou *allochtones**, c'est-à-dire issus d'apports.

Enfin, la nature des constituants permet d'établir des relations spatiales entre surfaces élémentaires, ce qui facilite les travaux de cartographie. Ainsi des surfaces formées sur des *colluvions** de même nature, par exemple calcaire, pourront être regroupées, éventuellement, dans une même unité cartographique.

- **La forme et la taille des éléments structuraux** :

De nombreuses définitions ont été proposées pour la structure du sol. MANICHON (1982) distingue ainsi celles qui privilégient :

- la phase solide : ce sont surtout la forme et la dimension des agrégats qui sont alors prises en compte,
- les vides : seule importe la taille des pores,



photo 78.
Structure polyédrique anguleuse,
sol alluvial argileux travaillé manuellement,
cuvette d'Agadez, Niger.



photo 79.
Structure continue, croûte d'érosion (ERO),
région de la mare d'Oursi, Burkina Faso.
A noter : un liseré de goudron a été coulé
à la périphérie de la parcelle
dans la zone perturbée lors de son installation,
afin d'assurer l'étanchéité des bordures.



photo 80.
Réseau lâche de fissures
sur une croûte d'érosion (ERO),
bassin versant de Tin Adjar, Mali.

- la phase solide et les vides : on s'efforce de déterminer les pourcentages respectifs des deux phases, indépendamment de leur forme ou de leur taille.

Tenant compte de la particularité des surfaces, nous nous attacherons surtout à définir la forme des éléments structuraux, la porosité et la fragilité.

Les pédologues français définissent l'agrégat comme "une unité naturelle tridimensionnelle d'un assemblage cohérent et défini de particules élémentaires" (ORSTOM, 1969). Lorsque ces agrégats constituent un microhorizon superficiel, il s'agit, le plus souvent, d'éléments de type anguleux. Selon l'épaisseur de ces éléments, on distingue des structures :

- prismatiques : agrégat d'épaisseur supérieure à 20 mm, délimité par des faces verticales bien marquées, exemple : des sédiments d'argile à l'amont d'un barrage à sec (photo n° 75),
- en plaquettes : épaisseur comprise entre 5 et 20 mm, exemple : des sédiments limoneux (photo n° 76),
- en plaquettes rebroussées (ou en squames, ou en "copeaux de dessiccation") : ce type de structure se distingue de la précédente par le recourbement des bords des plaquettes, exemple : de minces sédiments argileux au fond d'une flaque à sec (photo n° 77),
- en écailles : si le diamètre moyen des plaquettes est inférieur à 2 cm,
- en lamelles : épaisseur comprise entre 1 et 5 mm,
- en feuilletts : épaisseur inférieure à 1 mm.

En conditions naturelles, les seules formes de structure arrondie, représentées dans les microhorizons superficiels, sont les boulettes fécales d'origine faunique : éléments de placage de récolte de termites, ou déjections de fourmis. Il s'agit alors d'une structure "coprogène".

Selon le degré de désagrégation d'un sol cultivé la structure passe, sous l'effet des pluies, par différents états (BOIFFIN, 1984) :

- **fragmentaire :**

chaque agrégat est bien délimité et indépendant de ses voisins. Sa forme peut être : (fig.27, voir page 106)

- polyédrique anguleuse : agrégats à faces planes et à arêtes anguleuses (photo n° 78),
- polyédrique subanguleuse : même type d'agrégats que précédemment mais à arêtes émoussées,
- cubique : agrégats en forme de cubes,
- grenue : agrégats en forme de sphères,
- grumelleuse : agrégats à faces courbes d'orientation quelconque,

- **fragmentaire altérée :**

alors que le contour des agrégats les plus grossiers tend à se maintenir, celui des plus fins disparaît au sein d'une structure continue (photo n° 48),

- **continue :** (photo n° 79)

on ne discerne plus les agrégats initiaux qui ont disparu au sein d'un ensemble massif, sans structure (on dit aussi continu).

Quel que soit le type d'agrégat, il convient d'en relever également la taille moyenne en millimètres.

En zone sahélienne, les structures fragmentaires, c'est-à-dire constituées d'agrégats, ne sont pas, toutefois, les plus fréquentes. La plupart des microhorizons présentent en effet une structure :

- soit **particulaire** : les constituants sont libres, "boulants", tels les sables grossiers d'un microhorizon piétiné par le bétail,
- soit **continue** (ou *massive*) : l'ensemble du microhorizon forme un ensemble unique. C'est, à titre d'exemples, la structure d'une pellicule plasmique, ou celle d'un microhorizon de sable fin pris en masse.

- **La porosité :**

Pour un volume de sol donné, la porosité représente, en pourcentage volumique, la fraction qui n'est pas occupée par la phase solide. Parmi les vides, on distingue les gros pores (> 10 microns), voies privilégiées des échanges d'air et d'eau, c'est la *macroporosité*, et les pores plus fins (< 10 microns) qui servent au stockage de l'eau, c'est la *microporosité*. A cet égard, rappelons la loi de POISEUILLE selon laquelle le débit dans un pore augmente en fonction de la puissance quatrième de son rayon. En d'autres termes, un pore de 10 mm de rayon, d'origine faunique par exemple, assure un débit 10.000 fois plus élevé qu'un pore d'un mm de rayon. On mesure, dès lors, toute l'importance de caractériser la macroporosité de surface.

A cet effet, nous distinguons trois types de macropores :

- **Les pores fonctionnels** de forme tubulaire, ouverts en surface, ils permettent l'infiltration de l'eau vers les horizons sous-jacents. Les plus importants en termes de taille et donc d'infiltration résultent de l'activité biologique : trous forés par les racines ou la faune du sol. On précise alors leur taille : quatre classes servent à décrire les pores selon le diamètre moyen de leur section :

- très fins : diamètre inférieur à 1 mm,
- fins : diamètre compris entre 1 et 2 mm,
- moyens : diamètre compris entre 2 et 5 mm,
- larges : diamètre supérieur à 5 mm. Dans ce dernier cas, leur taille permet de les dénombrer ; on notera alors leur densité par mètre carré

- **Les pores temporairement fonctionnels** : les fentes et fissures.

La plupart des craquelures et fentes, abondantes en saison sèche, se referment au cours de la saison des pluies. Le temps nécessaire à leur fermeture, et donc la



photo 81.
Réseau dense de fissures partiellement colmatées
sur une croûte de décantation (DEC),
bassin versant de Tin Adjar, Mali.



photo 82.
Réseau dense de fentes larges et profondes,
délimitant des prismes,
dans une croûte de décantation (DEC),
dépôts argileux de l'amont d'un barrage à sec,
cuvette d'Agadez, Niger.

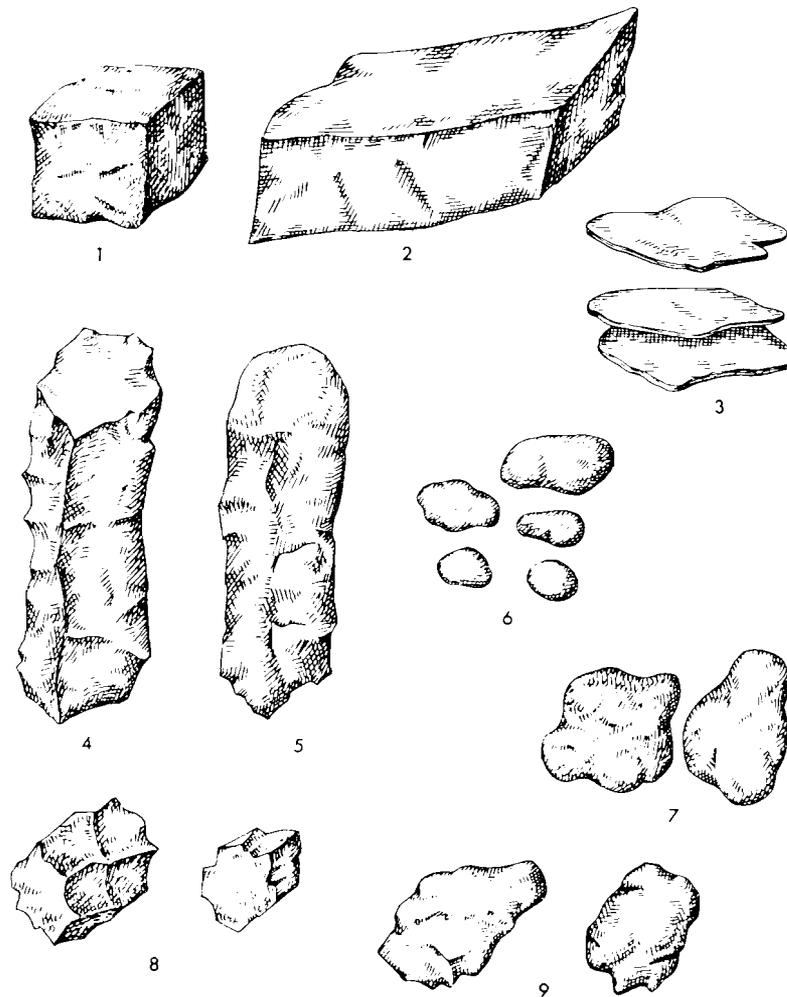


photo 83.
Porosité vésiculaire dans une croûte polygénique
de ruissellement (RUI),
Revane, Ferlo, Sénégal.

durée de leur influence sur l'infiltration, varient en fonction de nombreux paramètres. Nous retiendrons les plus faciles à relever sur le terrain (photos n° 80 à 82) :

- largeur des fentes et fissures que l'on mesure en mm,
- écartement : lorsqu'elles dessinent un réseau, on note la longueur moyenne du côté des polygones,
- profondeur : on précise la profondeur de ces fentes ou fissures en mm, en signalant si elles traversent le microhorizon ou y aboutissent.
- **Les pores non fonctionnels.** En dépit d'une très forte porosité, un microhorizon peut présenter une infiltrabilité très réduite lorsque les pores ne communiquent pas les uns avec les autres : il s'agit de petites cavités plus ou moins sphériques qui correspondent à des bulles d'air emprisonnées dans le microhorizon. Ce

sont des vésicules, d'où le nom de *porosité vésiculaire*, attribué à ces vides. Ces pores non fonctionnels constituent un des éléments clefs de la description des surfaces sahéliennes. Ils fournissent, en effet, un indice très précieux de conditions défavorables pour l'infiltration. C'est ainsi que l'on a pu établir une très bonne relation entre l'abondance de ces pores dans les microhorizons de surface et l'aptitude au ruissellement (ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1986). Ceci n'est pas étonnant : ces vésicules se forment en effet lors de l'humectation lorsque l'air du sol ne peut s'échapper dans aucune direction, du fait d'une forte imperméabilité du milieu (EVENARI, YAALON et GUTTERMAN, 1974 ; FIGUEIRA et STOOPS, 1983). De nombreux auteurs ont décrit ce type de porosité



1. structure cubique
2. structure en plaquettes
3. structure lamellaire

4. structure prismatique
5. structure colonnaire
6. structure grenue

7. structure grumeleuse
8. structure polyédrique
9. structure subangulaire ou nuciforme

Figure 27

Différents types de structure (d'après MAIGNIEN, 1969)



photo 84.
*Affleurement de grès en dalles,
bassin versant de Koumbaka, Mali.*

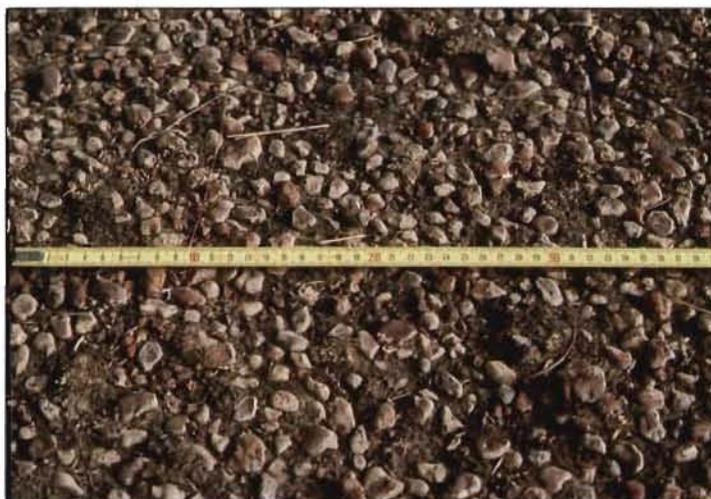


photo 85.
*Gravillons libres (croûte G),
bassin versant du Kuo, Burkina Faso.*



photo 86.
*Surface à gravillons libres (croûte G),
bassin versant du Dounfing,
région de Bamako, Mali.*

dans la zone aride africaine : BOCQUIER, (1971) ; CHEVERRY, FROMAGET et BOCQUIER, (1972), VALENTIN, (1981), KOOISTRA et SIDERIUS, (1986). Toutefois, pour une personne non avertie, il peut être difficile de la décèler. Lorsque cette porosité vésiculaire est particulièrement développée dans un microhorizon de sable fin, elle provoque un crissement caractéristique sous les pas qui laissent des empreintes profondes de quelques millimètres. En pratique, il est nécessaire de prélever un petit échantillon de surface et de souffler fortement sur sa tranche (photo n° 83). On estime alors visuellement le pourcentage de surface occupée par la section de ces sphères ainsi que leurs diamètres moyen et maximal.

● **La fragilité :**

A l'état sec, le degré de cohésion entre les constituants s'évalue en terme de fragilité. Il s'agit d'une variable importante non seulement pour l'identification des microhorizons mais aussi pour les contraintes mécaniques dont elle est l'indice : une pellicule plasmique très dure peut s'opposer à la levée des semences. Il existe de nombreux appareils pour apprécier la résistance à la pénétration (les pénétromètres) ; cependant, leur utilisation ne nous paraît pas indispensable pour répondre à l'objectif que nous nous sommes assigné. Aussi avons-nous adopté une échelle de notation, inspirée de celle de MAIGNIEN (1980), dotée des graduations suivantes :

- **très fragile** : le microhorizon se réduit en poudre sous l'effet d'une très légère pression des doigts. Tel est le cas des microhorizons sableux pris en masse. Précisons que cet adjectif ne peut être appliqué qu'à un microhorizon dont la structure est continue ou fragmentaire ; pour une structure particulière, il n'existe en effet aucune liaison entre les constituants ; on parle alors de microhorizon *boulant*,
- **fragile** : le microhorizon oppose une certaine résistance à l'écrasement mais il se brise encore aisément entre les doigts (ce qui équivaut à une force supérieure à 4 kg),
- **dur** : il n'est plus possible de le briser entre les doigts. En revanche, il s'écrase dans la main (force supérieure à 8 kg),
- **très dur** : l'échantillon ne se brise que s'il est compressé entre les deux mains (force supérieure ou égale à 16 kg).

Les microhorizons de référence

La phase qui succède à l'analyse des caractères des microhorizons consiste en une première *synthèse* qui, par nature, fait nécessairement appel à une réduction de l'information. On perçoit, dès lors, tout le danger qu'il y aurait à négliger l'étape précédente.

Synthèse à risque, certes, mais synthèse nécessaire : en voici les principales fonctions.

● Tout d'abord, elle facilite des regroupements parmi les microhorizons les plus semblables, susceptibles de présenter des comportements voisins. De telles associations s'avèrent indispensables : en dépit de la complexité des organisations naturelles, il convient d'en livrer une vision schématique, modélisée (mais non caricaturale...), tant pour les applications pratiques que pour le transfert des connaissances. Reste toutefois à répondre, au préalable, à une question légitime : comment procéder de manière objective au choix des critères les plus importants ? C'est l'analyse statistique qui permet le mieux de s'affranchir de toute subjectivité (ALBERGEL, RIBSTEIN et VALENTIN, 1986). C'est elle qui préside à nos choix.

● Ensuite, de tels regroupements conduisent à la définition de grands types de microhorizons, et donc à l'établissement d'une typologie. Faut-il préciser, s'il en est besoin, que toute typologie ne constitue qu'un outil qui, par nature, reflète l'état des connaissances à un instant donné ? En aucun cas, elle ne doit définir un système rigide, fermé, figé. Aussi faut-il éviter de codifier à l'extrême au risque d'entraver toute possibilité de perfectionnement.

● Enfin, comme nous le verrons par la suite, c'est l'agencement des microhorizons qui permettra la définition de l'organisation directement supérieure, celle des croûtes.

Cette typologie se fonde d'abord sur la granulométrie des microhorizons, ensuite sur leur structure. Parmi ces horizons de référence, nous indiquerons les variantes les plus fréquentes :

● **Les microhorizons grossiers**

Par définition, ce sont les microhorizons constitués d'éléments supérieurs à 2 mm. Ils se répartissent en trois groupes principaux :

- Les horizons grossiers **continus** : il s'agit des affleurements de roche, de carapace ou de cuirasse, sous forme de structure continue, c'est-à-dire en dalle (photo n° 84).
- Les microhorizons grossiers **libres** (photos n° 85 et n° 86) : quelle que soit leur taille, les éléments grossiers ne présentent des liens, ni entre eux, ni avec la terre fine (encore appelée matrice).
- Les microhorizons grossiers **inclus** (photos n° 87, n° 88 et n° 89) : les éléments grossiers ne peuvent être ôtés de la surface du sol sans la perturber. Ils sont enchâssés, au moins partiellement, dans les microhorizons sous-jacents.

A noter que la *structure* des constituants se trouve ici privilégiée aux dépens de leur taille : dès lors qu'ils excèdent 2 mm, il n'est pas nécessaire de préciser leur dimension.



photo 87.
Gravillons inclus dans une croûte structurale (ST3),
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.



photo 88.
Gravillons inclus dans une croûte structurale (ST3),
bassin versant de Tin Adjar, Mali.
A noter : la porosité vésiculaire
dans le microhorizon sableux fin
et la pellicule plasmique.

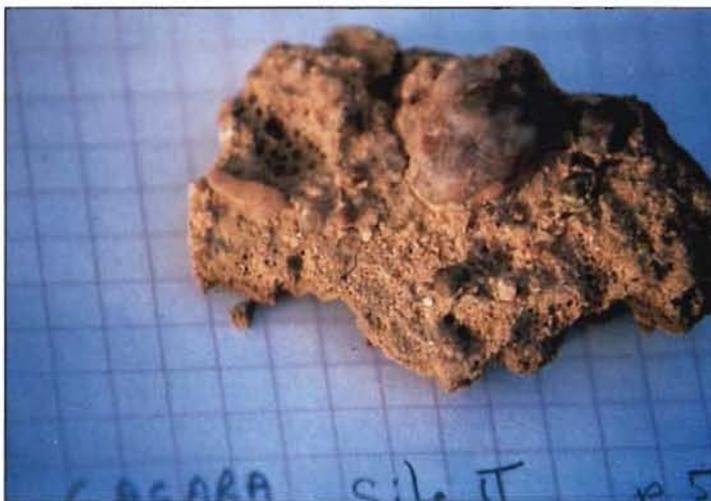


photo 89.
Gravillons inclus dans une croûte
à charge grossière (G),
bassin versant de Gagara, Burkina Faso.

● **Les microhorizons sableux :**

En revanche, pour les microhorizons sableux c'est le *degré de tri granulométrique*, et donc bien un critère de taille, qui apparaît en tête de la clef de détermination :

Les microhorizons sableux *faiblement triés* : ils contiennent des sables grossier et fin. Les principales variantes en sont :

- A structure continue, épais souvent de quelques millimètres, légèrement pris en masse ; ils caractérisent, comme nous le verrons, les croûtes de dessiccation.
- A structure continue, très fins : ils présentent une succession de nombreux feuillets.
- A limite supérieure ondulée : tel est le cas des *microrides de déflation*. Le tri opéré par le vent favorise l'apparition d'un gradient textural, trop peu marqué toutefois pour assurer l'individualisation de plusieurs microhorizons.

Les microhorizons sableux *bien triés* : si les différents mécanismes de différenciation ont conduit à une séparation nette entre les deux grandes classes granulométriques des sables, on est amené à distinguer les types :

- à **sable grossier** : le plus souvent particulaires, et donc boullants,
- à **sable fin**
 - particulaires, boullants,
 - continus, pris en masse, sans porosité vésiculaire,
 - continus, pris en masse, à porosité vésiculaire,
 - continus, en feuillets (polygénie) : cas des dépôts éoliens.

● **Les microhorizons plasmiques**

Les microhorizons plasmiques, rappelons-le, semblent contenir à l'œil nu plus de plasma (<0,05 mm) que de sable. On distingue les grands types suivants :

● **A structure fragmentaire**

- A agrégats : cas des microagrégats issus de constructions fauniques, ou d'une surface qui vient d'être travaillée et n'a pas encore subi l'effet des pluies. Ces mottes se caractérisent par leur taille et leur structure (polyédrique, grenue,...),
- A éléments séparés par des fentes :
 - plaquettes, souvent limoneuses,
 - squames (plaquettes rebroussées), souvent argileuses ; microhorizons fréquents dans les fonds de flaques desséchées
 - prismatique : polygones d'argile ; exemple : les fonds de retenues de barrages à sec.

● **A structure fragmentaire altérée**

- **Pellicule structurale** : elle présente une assez forte rugosité due à la présence d'anciens agrégats plus ou moins fondus en son sein. Ce type de microhorizon se différencie, par exemple sur les champs, au cours des pluies.

● **A structure continue**

■ **Pellicule affleurante**

d'érosion : elle est alors fréquemment fine et solide de l'horizon sous-jacent.

■ **Pellicule enterrée**

elle se trouve sous d'autres microhorizons, le plus souvent sableux et pris en masse, ou appartenant à un ensemble polygénique.

Il ressort de ce rapide inventaire qu'il est possible de ramener l'ensemble des microhorizons de la zone sahélienne à 9 grands types (19 si l'on comptabilise l'ensemble des variantes). Leur combinaison va nous permettre maintenant d'identifier les principales croûtes de surface.

LES CROÛTES DE SURFACE

Clef de détermination

La figure 28 fournit la clef de détermination des principaux types de croûtes superficielles. Devant répondre à des impératifs pratiques, les critères d'identification se veulent simples. La première étape demande au descripteur de préciser, au premier coup d'œil, ce qui en pratique ne pose aucun problème, la taille des constituants du microhorizon de surface : éléments grossiers, sable ou plasma. Selon la réponse fournie, la seconde étape fait appel :

- soit au nombre de microhorizons constitutifs du microprofil,
- soit à la structure du microhorizon affleurant.

Cette clef permet l'identification de 9 types principaux. Leur désignation fait référence à leurs mécanismes de formation (cf. chapitre 11).

Les principales croûtes sahéliennes

● **Croûte de dessiccation : DES**

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. Ce type de croûte recouvre fréquemment les microbuttes sableuses enherbées. Il importe de s'assurer qu'aucun autre microhorizon ne se trouve à moins de 7 cm de profondeur, particulièrement aucune pellicule plasmique, auquel cas il s'agit d'une croûte structurale sableuse à 2 microhorizons (cf. *infra* - photo n° 90).

● **Croûtes structurales : ST**

à **sable dominant** :

on distingue deux grands types :

- à deux microhorizons, **ST2** :

Constitué de sable peu trié, souvent pris en masse et continu, le premier microhorizon, couvre une pellicule

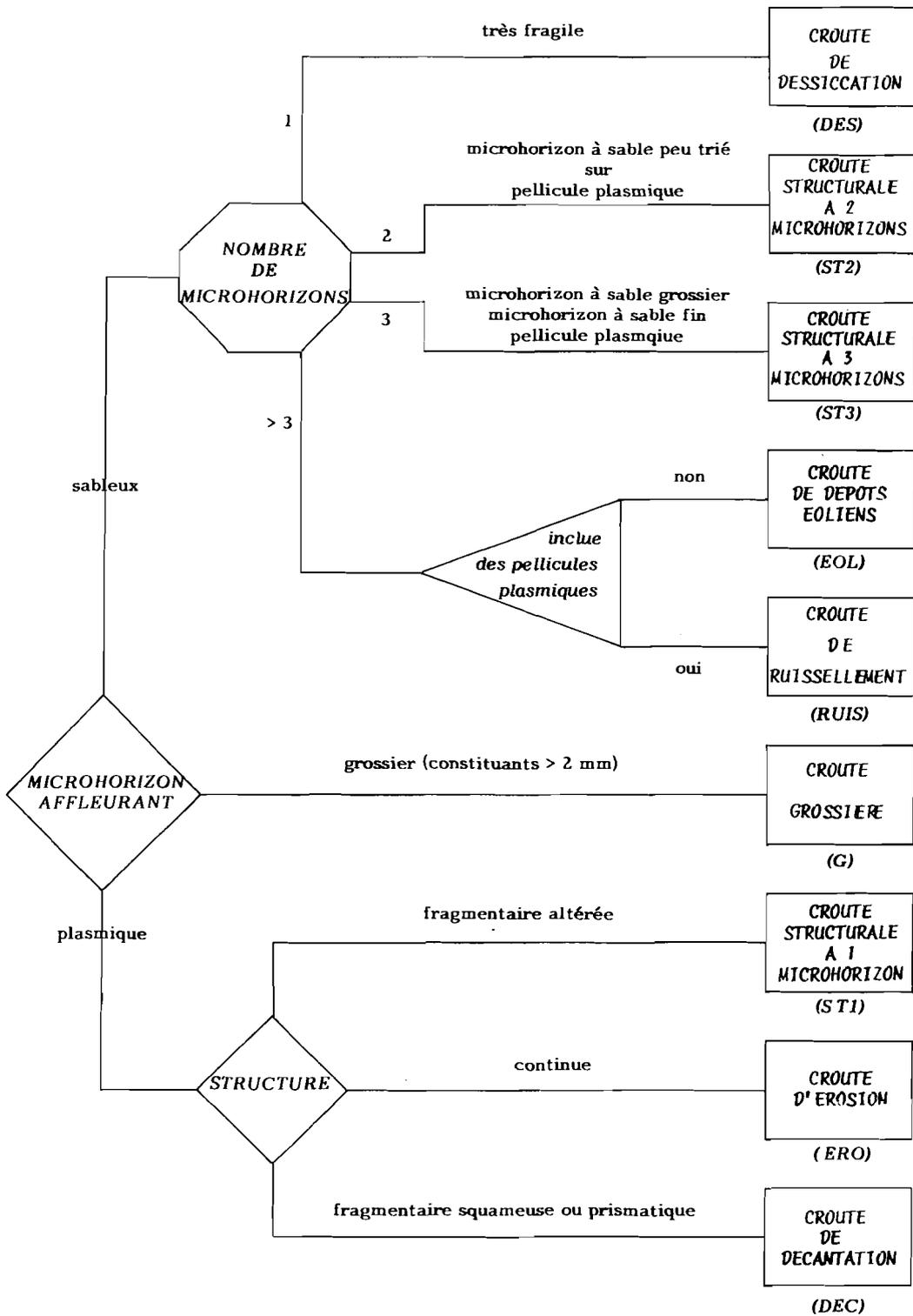


Figure 28
Clef de détermination des mops

le plasmique peu épaisse. Dans ces deux microhorizons, la porosité vésiculaire reste discrète (photo n° 91).

On assimile à ce groupe :

- les croûtes de dépôts éoliens qui, sous l'effet d'apports d'éléments fins, se sont enrichies en plasma, celui-ci s'étant individualisé sous la forme de pellicules (photo n° 73).
- les croûtes de dessiccation sur micro-buttes sableuse lorsque l'épaisseur au dessus d'une pellicule plasmique est inférieure à 7 cm (photo n° 92).

■ à trois microhorizons, ST3 :

Ce type d'organisation très fréquent présente du haut en bas :

- un microhorizon constitué de sable grossier, souvent bouillant,
- un microhorizon de sable fin pris en masse, à forte porosité vésiculaire,
- une pellicule plasmique, à porosité vésiculaire ; sa couleur, noire, grise ou rouge, contraste avec celle des sables sus-jacents blancs, jaunes ou roses (photo n° 93).
- à plasma dominant : ST1

Elle n'est formée que d'une pellicule structurale. Celle-ci, rappelons-le, se distingue de la pellicule plasmique d'érosion par sa forte rugosité. Celle-ci est due à la présence d'anciens agrégats ou mottes, partiellement fondus au sein de la croûte. Généralement assez épaisse (pouvant atteindre 10 mm ou plus), elle correspond à un premier stade de réorganisation des sols travaillés, argileux ou limoneux. Elle ferme alors la porosité superficielle, contrastant ainsi avec l'horizon travaillé sous-jacent où peut se maintenir une forte macroporosité (photo n° 46 et n° 47). Dans le cas des buttes et des billons, ce type de croûte se maintient assez longtemps sur les points hauts avant de se transformer, le cas échéant, en croûte d'érosion (photo n° 94). Les micro-profilés ouverts dans les points bas font apparaître une succession verticale de croûtes : de type ST1 à la base, recouverte d'une croûte de ruissellement RUI, ou/et de décantation DEC (figure 29).

● **Croûte d'érosion : ERO**

Selon la profondeur de l'horizon atteint par le décapage, on est amené à distinguer les croûtes d'érosion :

■ d'horizon A

Une telle croûte n'est formée que d'un seul microho-

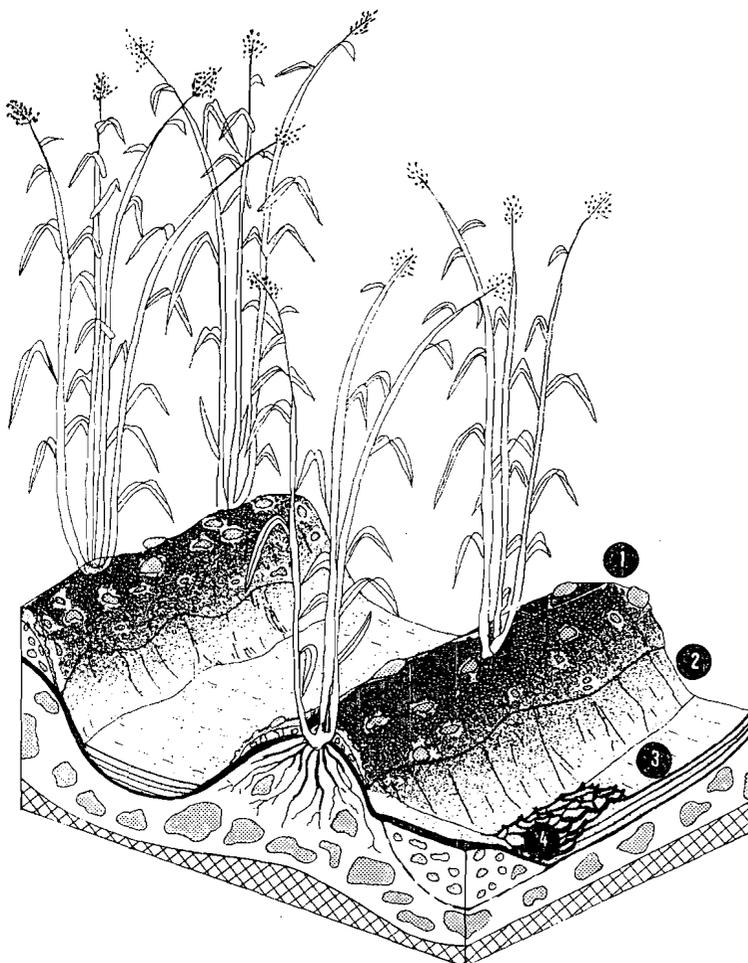


Figure 29
Types de croûtes superficielles
sur un champ de sorgho :

- 1 - Croûte structurale ST1
- 2 - Croûte d'érosion ERO
- 3 - Croûte de ruissellement RUIS
- 4 - Croûte de décantation DEC -
en amont de la cloison interbillons.



photo 90.
Recouvrement sableux piétiné
au-dessus d'une pellicule plasmique,
Tessékéré, Ferlo, Sénégal.



photo 91.
Croûte structurale à deux microhorizons (ST2):
sableux grossier en surface, plasmique à la base,
région d'Agadez, Niger.



photo 92.
Croûte de dépôt éolien
sur microbutte sableuse enherbée,
enrichie en plasma,
assimilée à une croûte structurale (ST2),
Tessékéré, Ferlo, Sénégal.

rizon, pellicule plasmique, souvent très peu épaisse, de couleur noire ou grise. Généralement elle conserve dans ses anfractuosités des reliques de microhorizons sableux. Elle correspond, en effet, à l'érosion, hydrique ou/et éolienne, de croûtes structurales à 2 ou 3 microhorizons (photo n° 95). Assez souvent, elle se trouve consolidée par la présence d'algues microscopiques qui lui confèrent alors une couleur noirâtre.

■ d'horizon B

Elle se distingue de la croûte précédente non seulement par la couleur (moins sombre), mais aussi par la forme très légèrement mamelonnée de la pellicule plasmique et par la présence de quelques fentes (photo n° 96). Il convient de s'assurer que l'horizon sous-jacent contient plus de 10% d'argile, certains horizons A de dune, pouvant être rouges également. Une telle croûte indique alors un stade avancé d'érosion.

■ d'horizon B gravillonnaire :

Ses caractères sont identiques à ceux du type suivant.

● **Croûte à charge grossière : G**

Dès lors que les éléments grossiers excèdent 40% de la surface, nous considérons celle-ci comme formée d'une croûte de type G., tant il est vrai que la présence d'une forte charge grossière en surface s'accompagne, le plus souvent, d'un degré de réorganisation maximal. Celle-ci diffère peu de ST3 : les éléments grossiers se trouvent enchâssés dans les trois microhorizons. Très souvent, la forte porosité vésiculaire sous les gravillons ou les cailloux confère une grande fragilité à la croûte (fig. 30). Précisons que la pellicule plasmique présente alors une épaisseur qui peut atteindre ou dépasser le centimètre (photo n° 97). Lors de la présentation des différents types de surfaces élémentaires, nous serons amenés à introduire quelques variantes qui, notons-le, dépendent du degré de réorganisation et non de la taille des éléments grossiers.

● **Croûte de ruissellement : RUI**

Les croûtes de ruissellement se composent de microhorizons sableux peu triés (photo n° 94) qui alternent avec de minces pellicules plasmiques (croûtes souvent polygéniques). Elles présentent fréquemment,

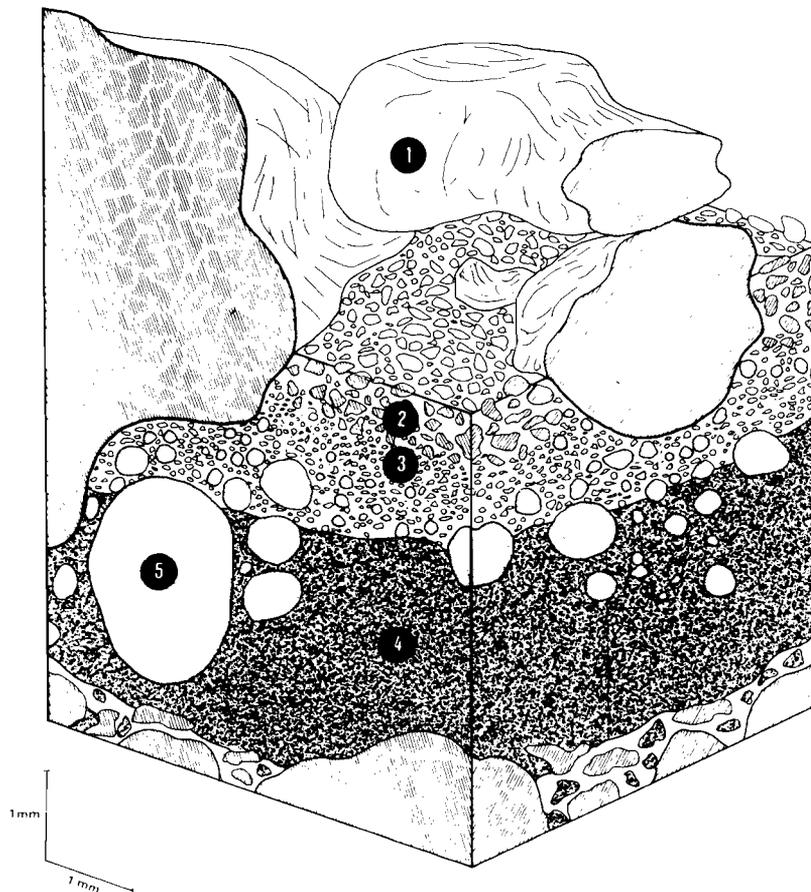


Figure 30
Croûte grossière

- 1 - Eléments grossiers
- 2 - Sable grossier
- 3 - Sable fin
- 4 - Plasma
- 5 - Porosité vésiculaire.

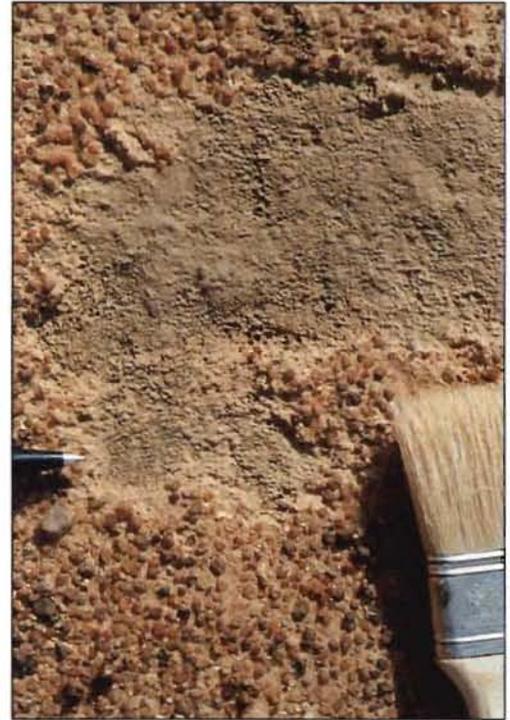


photo 93.
*Croûte structurale à trois microhorizons (ST3):
 sable grossier en surface partiellement inclus dans le microhorizon
 de sable fin sous-jacent, recouvrant la pellicule plasmique,
 bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.*



photo 94.
*Profil cultural faisant apparaître une croûte
 structurale à 1 microhorizon (ST1) sur les billons
 et une croûte de ruissellement (RUI) en interbillons,
 bassin versant de Galmi, Niger.
 A noter : la structure fragmentaire altérée
 de la croûte ST1,
 et la limite légèrement ondulée du travail du sol.*



photo 95.
*Croûte d'érosion (ERO) d'horizon A
 de sol vertique dégradé,
 bassin versant de Mouda, Cameroun.
 A noter : les quelques fissures qui témoignent
 de la présence d'argile dans le sol.*

une forte porosité vésiculaire et leur épaisseur peut atteindre plusieurs centimètres en interbillons sur faible pente (photo n° 98). En milieu naturel, elles se localisent le long des axes d'écoulement.

● **Croûte de décantation : DEC**

C'est le microhorizon superficiel qui permet d'identifier aisément les croûtes de décantation : il est fragmentaire, en polygones qui délimitent des prismes, des plaquettes, ou des squames (plaquettes rebroussées - photo n° 99). Le tri granulométrique qui préside à la formation de ce type de croûte est conforme à la sédimentation : les éléments grossiers se trouvent à la base, les éléments fins au sommet. Il y a lieu d'observer le microprofil sur une dizaine de centimètres pour s'assurer qu'il n'existe pas d'autres mops sous-jacentes.

● **Croûte de dépôts éoliens : EOL**

Les dépôts éoliens qui n'ont pas subi de réorganisations notables se caractérisent par une succession de microhorizons sableux très minces, légèrement pris en masse et très fragiles. Leur épaisseur peut atteindre sur dunes plusieurs décimètres (photo n° 100). Le plasma en est quasi-absent. Leur comportement hydrique est assimilé à celui des croûtes de dessiccation (DES). Couverts de végétation, ils peuvent s'enrichir en plasma et se couvrent alors d'autres types de croûtes : de dessiccation, structurale à 2 microhorizons, à 3 microhorizons, voire d'érosion (cf. la dynamique des croûtes en 5^{ème} partie).

Quelques croûtes plus rares

Nous venons de passer en revue, pour la zone sahélienne, les croûtes les plus importantes par leur extension. Sans prétendre en dresser une liste exhaustive, nous en citons quelques autres, plus spécifiques de certains milieux. Pour chacune d'entre elle, nous nous efforcerons de préciser lequel des neuf types précédents lui ressemble le plus. Cette analogie, notons-le, concerne le comportement hydrique et non les organisations proprement dites.

● **Les efflorescences salines**

Dans certaines conditions particulières, le sol peut se couvrir de cristaux de sels solubles ; ils constituent ce que l'on appelle des efflorescences. AUBERT (1976) en distingue deux types :

- Le salant blanc : sa couleur grise ou blanche témoigne de la présence de chlorures et de sulfates de sodium et de magnésium auxquels s'ajoutent parfois des sels de calcium. Il se manifeste principalement à l'état humide ; sec, il subit fréquemment l'érosion éolienne et disparaît.
- Le salant noir : il forme une véritable croûte brune ou noire associant bicarbonates, carbonates de sodium et matière organique.

A ce sujet, il est bon de rappeler que la nature chimique et la couleur des cristaux peuvent subir des évolutions saisonnières, tout comme leur structure (MOUGENOT, 1983). Au cours de la saison des pluies, la surface du sol prend la consistance d'une boue plus ou moins visqueuse. En saison sèche, elle évolue en plaquettes polygonales. Lorsque le chlorure de sodium cristallise en baguettes de taille suffisante, les plaquettes éclatent et se résolvent sous forme de poudre.

Dans des milieux très particuliers, et sous les conditions sèches actuelles, la présence de sulfates à la surface des sols sulfatés acides du Sine-Saloum et de Casamance (Sénégal) donne naissance à des efflorescences spectaculaires (photos n° 101 et n° 102).

Ces efflorescences salines n'occupent toutefois qu'une part limitée du Sahel (cf. 5^{ème} partie). Les points où elles apparaissent correspondent, sous une pluviométrie annuelle inférieure à 700 mm, soit au domaine fluviomarain, soit à des zones de fort endoréisme : rives argileuses de lacs et de dépressions. A cet égard, la cuvette tchadienne réunit les conditions les plus propices à leur formation. Dans la pratique, on assimilera ces surfaces salines à des croûtes d'érosion.

● **Les microrides d'éolisation**

Soumis à une intense déflation, le sable a tendance à former de petites ondulations (photo n° 68). Leur présence témoigne ainsi d'une érosion éolienne marquée mais ces légères ondulations n'ont qu'une influence négligeable sur l'infiltration de l'eau. Celle-ci, en effet, est contrôlée par le type de mops sous-jacentes. Dans le cas où ces rides ne recouvrent aucune organisation pelliculaire, on les assimile à une croûte de dessiccation.

● **Les pellicules sur sols rendziniiformes**

(photo n° 103)

Une rendzine est un sol développé sur une roche calcaire dont l'horizon superficiel est riche en matière organique et en carbonates (effervescence à l'acide), de couleur foncée et de structure grumeleuse (c'est-à-dire en grumeaux). Sur un des bassins versants étudiés, Kountkouzout, dans la région de l'Ader Douchi, au Niger, se trouvent des sols que GAVAUD (1977) a appelé des "para-rendzines". Leurs propriétés en font des intergrades (c'est-à-dire des combinaisons) entre rendzines et vertisols. Leur surface est couverte d'une pellicule structurale, très fine, fragile et discontinue. En pratique, elle sera assimilée à une croûte de type ST1. Sur les sols riches en débris coquilliers, son existence est très fugace (photo n° 104) du fait de sa très grande fragilité.



photo 96.
 Croûte d'érosion (ERO) d'horizon B de sol ferrugineux,
 en position de chanfrein,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
 A noter : à l'arrière plan, le déchaussement de la racine
 du *Balanites aegyptiaca* (Linn.) Del..



photo 97.
 Croûte à charge grossière (G),
 bassin versant d'Agassaghas, Niger.
 A noter : la forte porosité vésiculaire
 sous les éléments grossiers.



photo 98.
 Croûte de ruissellement (RUI)
 développée entre les billons,
 station de recherche de Misamfu, Zambie.
 A noter : la polygénie marquée
 et l'alternance des microhorizons sableux
 et des pellicules plasmiques.

LE SOL

Principes généraux

Au fil des chapitres précédents, nous avons maintes fois souligné le rôle déterminant des états de surface sur le contrôle de l'infiltration. Faut-il délaissier pour autant tout examen du sol sous-jacent ? Certes non, pour trois raisons majeures :

- En premier lieu, la porosité superficielle peut rester ouverte à la faveur d'une forte activité faunique ou de l'absence de réorganisations pelliculaires. Il y a tout lieu, alors, de considérer que ce sont les propriétés hydrodynamiques du sol qui interviennent sur l'infiltrabilité.
- Ensuite, il existe parfois, à faible ou moyenne profondeur, une discontinuité pédologique : apparition d'une cuirasse, d'un horizon continu argileux, ... ou anthropique : semelle de labour, niveau compacté par des roues de tracteurs. Or, ces obstacles diminuent les intensités d'infiltration même en l'absence de croûtes en surface. Notons que pour les sols cultivés, l'existence d'une semelle de labour favorise un engorgement superficiel, lui-même propice à la formation d'une croûte structurale (ST1) en surface (BOIFFIN, 1984). Il convient, en conséquence, d'examiner avec soin le profil cultural.
- Enfin, l'étude conjointe des états de surface et du sol fournit la possibilité d'établir certaines relations : les recouvrements sableux enherbés peuvent, par exemple, se localiser préférentiellement là où le sol offre les meilleures réserves hydriques, tandis que les surfaces dénudées peuvent correspondre à des sols très peu profonds (VALENTIN, 1985a). La mise en évidence de telles règles de distribution s'avère utile lors des études cartographiques ou de dynamique évolutive (cf. 5^{ème} Partie).

Ces principes admis, reste à préciser les critères minimaux à prendre en compte, lors de la description d'une surface élémentaire. Ici encore, c'est l'expérience qui a dicté nos choix.

Les critères retenus

● *Texture*

La composition granulométrique d'un sol n'est pas le seul facteur déterminant de son infiltrabilité. Intervient aussi, pour une bonne part, sa structure. Celle-ci entre dans la définition des types de sols, aussi l'aborderons-nous plus loin. Dans la typologie des surfaces élémentaires, la texture des 40 premiers centimètres du sol joue comme élément modulateur (cf. chapitre 15). Pour la zone sahélienne, on distingue trois classes de texture :

- Très sableuse : les sables représentent au moins 90% ;

même humecté un échantillon ne colle pas aux doigts, ni ne les salit.

- Argileuse : le taux d'argile excède 40%. Il est alors possible de former un fuseau en roulant un échantillon humecté entre les mains.
- Moyenne : regroupe toutes les textures intermédiaires. Elle n'est pas prise en compte dans la typologie des surfaces élémentaires.
- *Profondeur d'apparition d'un horizon à perméabilité limitée*

Parmi les horizons à perméabilité limitée, figurent certains niveaux hydromorphes, des carapaces, ou des cuirasses. Les premiers se signalent par l'abondance des taches de couleur rouille, ou par des reflets bleutés ou verdâtres (photo n° 105). Trois classes de profondeur ont été retenues :

- de 0 à 20 cm,
- de 20 à 40 cm,
- de 40 à 80 cm.

En pratique, l'examen peut être effectué dans une fosse ou à partir d'un forage à la tarière. On le limite à 80 cm, les horizons plus profonds n'ayant aucune incidence, en climat sahélien, sur le ruissellement.

● *Type de sol*

Seuls quelques types de sols présentent un fonctionnement hydrodynamique caractéristique : nous avons déjà mentionné les sols salés (efflorescences salines), les para-rendzines, les régosols développés sur cuirasse subaffleurante et les sols hydromorphes. A ceux-là, il convient d'ajouter :

- Les lithosols (photos n° 20 et n° 84) : il s'agit de l'affleurement d'une roche inaltérée dure (ou d'un horizon grossier continu si l'on se réfère à la nomenclature précédente).
- Les cuirasses dénudées.
- Les vertisols (photos n° 50 et n° 67) : ils se caractérisent, rappelons-le, par leur forte teneur en argiles gonflantes, et par la présence depuis la surface de fentes larges de un à plusieurs millimètres sur une profondeur de un à plusieurs décimètres. Lors de l'humectation, les phénomènes de gonflement provoquent la fermeture des fentes. Parfois la surface présente des bosses de quelques centimètres de haut et décimètres de large : c'est le microrelief "gilgai".
- Les sols bruns eutrophes (photo n° 61) : on les reconnaît à leur structure fine grumeleuse (en grumeaux) ou nuciforme (en forme de noix) et à leur porosité superficielle élevée (pas ou peu de croûte en surface). Souvent de couleur brune, ils peuvent contenir une forte charge grossière ; ce sont alors des régosols à faciès brun eutrophe que nous distinguerons par la suite des autres sols pierreux. Ils se localisent essen-



photo 99.
 Croûte de décantation (DEC)
 à l'amont d'une digue filtrante,
 bassin versant de Bidj, Burkina Faso.
 A noter : les plaquettes qui se détachent aisément
 de la surface du sol.

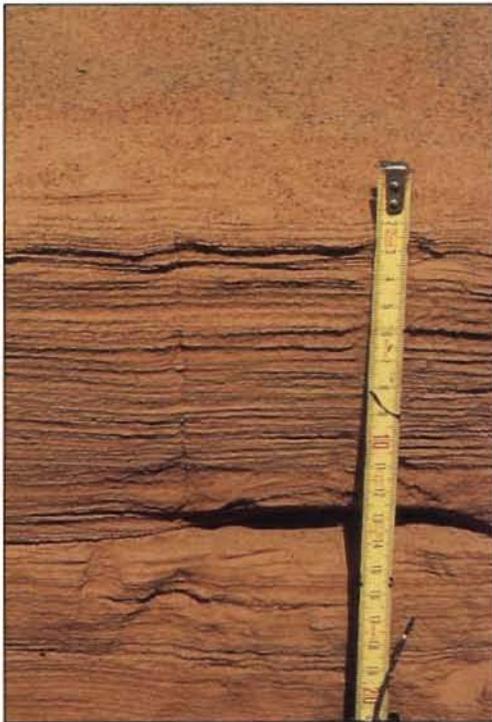


photo 100.
 Croûte de dépôts éoliens (EOL) sur dune,
 bassin versant de Tin Adjar, Mali.
 A noter : la polygénie développée sur une grande épaisseur.



photo 101.
 Croûte saline (NaCl) sur sols sulfatés acides
 de mangrove ("Tannes vifs"),
 Casamance, Sénégal.
 A noter : le microrelief dû à des boursouffures
 de dégazage (méthane).

tiellement sur les collines de roches vertes. Celles-ci, amphibolites, dolérites, gabbros, ..., se caractérisent par la présence de minéraux riches en silicates calciques : épidotes, amphiboles. L'abondance des champs, ou, en conditions naturelles, la densité du couvert herbacé, témoigne non seulement des bonnes propriétés physiques de ces sols mais également de leur richesse chimique en bases. D'ailleurs eutrophe ne signifie-t-il pas en grec "bien nourri" ?

LA FICHE DES RELEVÉS MINIMAUX

Au terme de cette longue énumération des critères à prendre en compte, lors de la description d'une surface élémentaire, il est indispensable d'en proposer une vision synthétique. Tel est l'objectif de la fiche ci-jointe (voir page 121 et 122), sorte de *vade-mecum* de terrain .

DESCRIPTION DES MICROHORIZONS				
Numéros des microhorizons	1	2	3	POLYGENIE
		EPAISSEUR		
0	EPAISSEUR
< 0,5 mm	TOTALE
± 0,5 mm
> 0,5 mm
		NETTETE DE LA TRANSITION		
t = 0
0<t<0,5 mm
0,5<t<1 mm
1<t<10 mm
t>10 mm
continuité (%)
affleurement (%)
		COULEUR		
Code MUNSELL ou
couleur principale
et qualificatif
		TEXTURE		
terre fine: plasma (%)
sable fin (%)
sable grossier (%)
charge grossière (%)
taille moyenne (mm)
nature des constituants
		STRUCTURE		
particulaire
fragmentaire
type*
taille des agrégats (mm)
fragmentaire altérée
continue
		PORES FONCTIONNELS		
diamètre (mm)
densité par m ²
		PORES TEMPORAIREMENT FONCTIONNELS		
largeur (mm)
écartement (mm)
profondeur (mm)
		POROSITE VESICULAIRE		
développement (%)
diamètre moyen (mm)
diamètre maximal (mm)
		FRAGILITE		
boulant
très fragile
fragile
dur
très dur

*Type de structure fragmentaire : polyédrique anguleuse, polyédrique subanguleuse, cubique, grenue, grumeleuse, prismatique, en plaquettes, en plaquettes rebroussées, en écailles, en lamelles, en feuilletés, ...



photo 102.
 Croûte de sulfates mixtes d'aluminium,
 de magnésium et de fer sur un sol sulfaté acide,
 Siné Saloum, Sénégal.
 Le pH mesuré "in situ" varie entre 1 et 2.



photo 103.
 Croûte développée sur para-rendzine,
 assimilée à ST1,
 bassin versant de Kountkouzout, Niger.
 A noter : la présence de graviers de calcaire
 à faible profondeur.



photo 105.
 Sol peu évolué d'apport colluvial hydromorphe,
 N'Dorola, Burkina Faso.
 A noter : les taches rouilles et blanches
 qui témoignent de la migration du fer
 sous l'effet de l'hydromorphie.

photo 104.
 Fragments de croûte, assimilée à ST1, sur un sol riche en débris coquilliers,
 bassin versant de Kountkouzout, Niger



LES PRINCIPALES SURFACES ÉLÉMENTAIRES

LES SURFACES NON TESTÉES SOUS PLUIE SIMULÉE

Certaines surfaces élémentaires de la zone sahélienne, bien qu'identifiées, n'ont pas été testées sous pluie simulée :

- Les *affleurements de roches* ou de *cuirasses*. Outre le fait qu'il est impossible d'implanter une parcelle de simulation de pluie sur une telle surface, leur infiltrabilité est avant tout fonction de la densité et du degré d'ouverture du réseau de fentes ou de fissures. Dans le cas d'une dalle continue, on peut prendre pour K_i , K_{i0} , K_{i20} (cf. les définitions, chapitre 3, §2) une valeur de 0 à 5%. Pour les surfaces plus fissurées, nous ne pouvons pas quantifier, dans l'état actuel de nos connaissances, les variables représentatives de l'infiltration. Il faut cependant savoir que pour une cuirasse très démantelée, et couverte alors d'une végétation arborée assez dense, l'infiltration peut être quasi-totale.
- Les surfaces des *vertisols*. Pour la même raison (maille du réseau de fentes très souvent supérieure au m^2), ces sols ne sont pas pris en compte dans cette typologie. De plus, ils sont difficiles à tester, les fentes ne se refermant pas toujours sous pluies simulées. Toutefois, pour ce type de sol, on peut prendre, sans grand risque d'erreur, pour K_i , K_{i0} , K_{i20} une valeur de 5 à 15% pendant le cœur de la saison des pluies (mois de juillet, août et septembre). Les valeurs de I_j , P_i et de P_{ih} peuvent être estimées, au cours de la même période, respectivement à 1-5 $mm \cdot h^{-1}$, 5-10 mm et 0-5 mm.
- L'affleurement d'*arènes granitiques* perméables, c'est-à-dire les produits de la décomposition des roches de type granitique. Les études de bassins versants représentatifs, menées dans le nord du Tchad, montrent que certaines arènes granitiques sont très perméables (TIXIER, 1958 ; BESLON, 1960 ; TIXIER et BESLON, 1961). De telles surfaces n'ont pas été identifiées dans la zone étudiée; au contraire, tous les tests sous pluies simulées, réalisés sur des arènes granitiques ont fait apparaître de très forts ruissellements (surface de type G modal).
- Les *dunes vives*. Ces formations, constituées de sable bouillant, sur une grande épaisseur, n'ont pas fait l'objet de mesures ; leur coefficient d'infiltration peut être évalué, sans risque important d'erreur, à 95-100%.

LES SOLS HYDROMORPHES

L'hydromorphie d'un sol influence fortement l'infiltration, mais ne se traduit pas, dans la zone étudiée, par des

états de surface particuliers. Nous n'avons pas pu, en effet, définir de critères d'état de surface permettant d'évaluer le degré d'hydromorphie. Rappelons que celle-ci se manifeste, dans les horizons concernés, par la présence de petites taches rouille (pseudogley) ou par des reflets bleutés ou verdâtres (gley). Encore faut-il souligner que le pseudogley ou le gley n'indiquent pas avec précision la nature et la durée de la saturation (VIZIER, 1984). Les différents types de surface élémentaire peuvent, pratiquement tous, se trouver sur des sols hydromorphes. Dans ce cas, les valeurs d'infiltration en sont fortement affectées. Considérant qu'en zone sahélienne, pour la majeure partie des sols, le front d'humectation ne descend que rarement en dessous de 80 cm de profondeur (à l'exception des sols de dune ou sur sables dunaires) et que les traces d'hydromorphie plus profondes n'entraînent aucune conséquence sur l'infiltration, nous avons considéré trois cas en fonction du degré d'hydromorphie :

- Traces d'hydromorphie entre 40 et 80 cm de profondeur : les valeurs moyennes des variables de l'infiltration correspondant au type de surface doivent alors être réduites de 20 à 30 %.
- Traces d'hydromorphie entre 20 et 40 cm de profondeur : réduction de 40 à 60 % des valeurs moyennes de l'infiltration.
- Traces d'hydromorphie entre la surface et 20 cm de profondeur : réduction de 80 à 100 % des valeurs moyennes de l'infiltration.

Les traces d'hydromorphie n'étant que le reflet de la position de la nappe en année moyenne, l'idéal serait de disposer de mesures directes de la profondeur de cette nappe avant d'appliquer ces coefficients réducteurs. Il est bien évident que si le sol est inondé, pendant une année exceptionnellement humide, l'infiltration y est nulle, même si les traces d'hydromorphie n'apparaissent qu'à 50 cm de profondeur par exemple.

VARIABLES CARACTÉRISTIQUES DU RUISSELLEMENT ET DE L'INFILTRATION

A chaque type de surface élémentaire correspond un comportement hydrodynamique particulier. Ce comportement est quantifié sous forme de valeurs moyennes (ou "modulées") que prennent certaines variables caractéristiques du ruissellement et de l'infiltration. Nous rappelons ci-après les définitions de ces variables.

Ruissellement

L_r : Equation de la lame ruisselée, en mm, de forme :

$$L_r = A P_u + B I_K + C P_u I_K + D$$

Cette équation donne une valeur moyenne de la lame

ruisselée pour le type modal. Nous mettons en garde le lecteur contre l'apparente précision de ces équations. Établies à partir d'un nombre limité de parcelles, elles ne peuvent fournir qu'une valeur approximative de la lame ruisselée. Dans la majeure partie des cas, la forme simplifiée :

$$Lr = A Pu + D$$

est largement suffisante pour estimer l'ordre de grandeur de la lame ruisselée.

Infiltration

Ki : Coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole = Somme des lames infiltrées/somme des hauteurs de pluie de toutes les averse, en %.

Ki0 : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol sec. Calculé à partir des équations $Lr(Pu, IK)$ avec $Pu = 50$ mm et $IK = 0$:

$$Ki0 = \frac{50 - Lr(50,0)}{50}, \text{ en \%}$$

Ki20 : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol très humide. Calculé à partir des équations $Lr(Pu, IK)$, avec $Pu = 50$ mm et $IK = 20$:

$$Ki20 = \frac{50 - Lr(50,20)}{50}, \text{ en \%}$$

Bien qu'elles ne soient pas directement comparables du fait du changement d'échelle, ces valeurs ($Ki0$, $Ki20$) sont à rapprocher de celles utilisées par RODIER (1984-1985). Cet auteur a calculé les coefficients de ruissellement des petits bassins versants sahétiens pour une pluie utile de 52,5 mm et des conditions d'humectation de sols intermédiaires entre $IK=0$ et $IK=20$.

I_l : Intensité limite de ruissellement pour un sol saturé en mm.h⁻¹

I_l : Point d'intersection de la première bissectrice et de la droite $Fn(I)$, correspondant à la plus forte valeur de IK du protocole. Cette valeur peut être assimilée au coefficient d'infiltration à saturation.

Pis : Pluie d'imbibition pour un sol sec = Quantité d'eau infiltrée avant le début du ruissellement sur un sol sec, en mm.

Pih : Pluie d'imbibition pour un sol très humecté = Pluie d'imbibition mesurée lors de l'averse correspondant à la plus forte valeur de IK du protocole, en mm.

Pour chaque type de surface, on précise la fourchette des valeurs moyennes pour chacune de ces variables et éventuellement des valeurs "modulées" en fonction de critères secondaires.

CLEF DE DÉTERMINATION DES SURFACES ÉLÉMENTAIRES

La typologie des surfaces élémentaires repose sur un certain nombre de critères d'identification dont les définitions ont été données dans les paragraphes précédents.

Surfaces cultivées

Étant donnée la vitesse d'évolution des états de surface, seules les surfaces cultivées au cours de l'année sont à prendre en compte dans ce groupe. Les jachères, au bout d'un an, peuvent être considérées comme des surfaces naturelles. Ce groupe des surfaces cultivées se subdivise en trois types selon l'abondance de la porosité vésiculaire observée dans les microhorizons, particulièrement dans les croûtes de ruissellement.

Type C1 : porosité vésiculaire absente ou très faible (<5 %)

Type C2 : porosité vésiculaire peu abondante (5 à 30 %)

Type C3 : porosité vésiculaire forte (>30 %).

Surfaces naturelles non ou peu anthropisées

Cette grande famille peut être subdivisée en 8 groupes en fonction de l'activité faunique, de la charge grossière et du type de croûte.

Surfaces à forte activité faunique

Elles sont caractérisées par la présence d'au moins 20 % de turricules de vers en surface. De telles surfaces ne s'observent que dans les zones où la pluviométrie annuelle est supérieure à 700 mm. Elles se partagent en 2 types en fonction du pourcentage de placages de termites.

Type TV (comme "Termites" et "Vers") : surfaces présentant au moins 30 % de placages de termites

Type V (comme "Vers") : surfaces présentant moins de 30 % de placages de termites.

Surfaces à faible activité faunique

Elles comportent moins de 20 % de turricules de vers en surface. On y distingue deux groupes en fonction de la charge grossière (éléments > 2 mm).

● Charge grossière occupant moins de 40 % de la surface

La subdivision de ce groupe en 5 types se fait à partir du type génétique de la croûte (cf. chapitres 11 et 14).

Type DES : pas de croûte ou croûte de dessiccation

Type ST2 : croûte structurale à 2 microhorizons

Type ST3 : croûte structurale à 3 microhorizons

Type ERO : croûte d'érosion

Type DEC : croûte de décantation.

● Charge grossière occupant plus de 40 % de la surface : type G (comme "grossier")

Afin de représenter au mieux toute la diversité possible des situations, nous avons été amenés à introduire dans certains types de surface des éléments "modulateurs" (couverture végétale, texture, microrelief) en plus des critères principaux d'identification. Ces éléments ne changent pas la définition du type de surface mais ont une influence sur les valeurs de l'infiltration.

Cette clef de détermination des types de surface élémentaire est résumée dans la fig.31

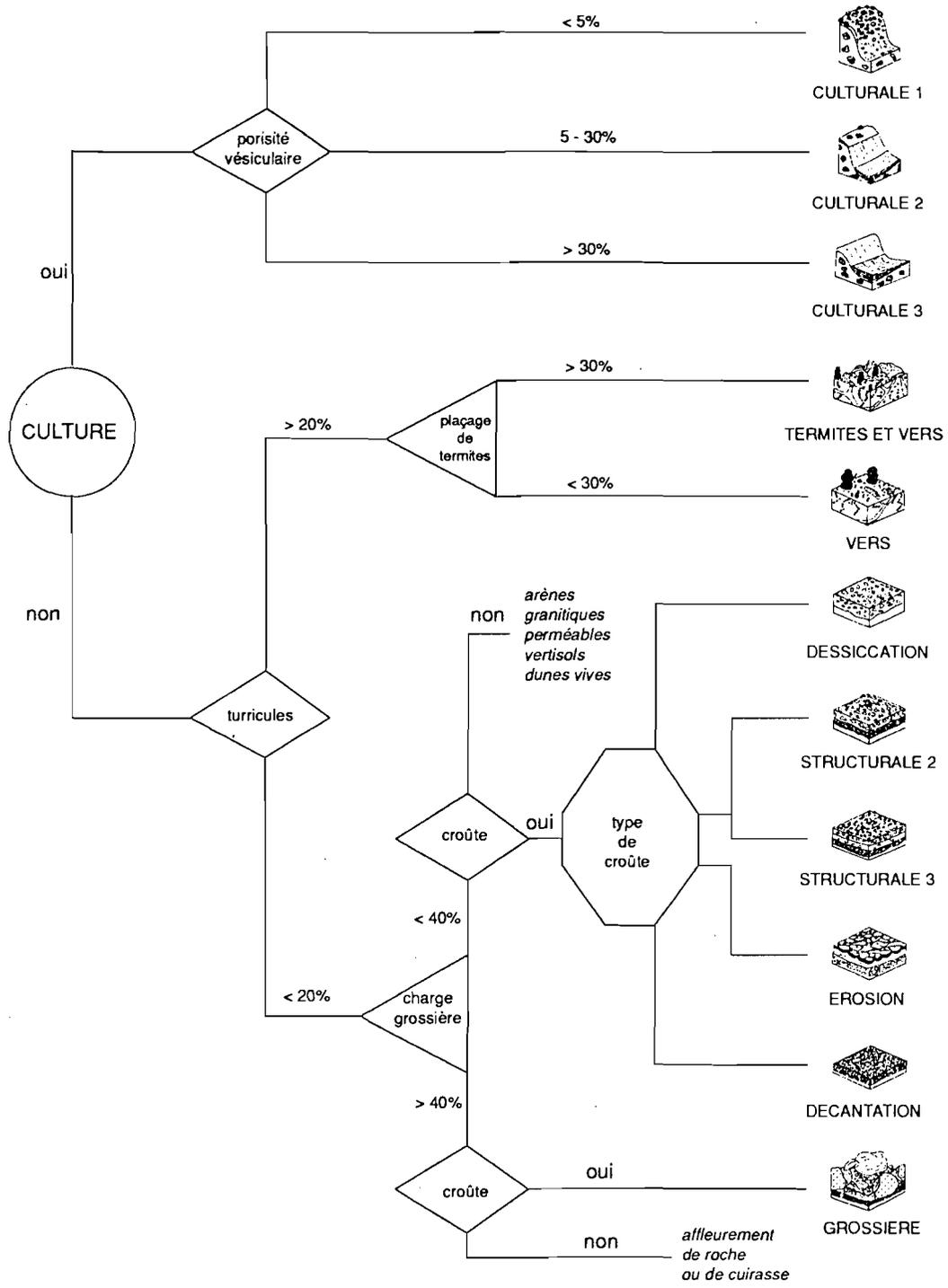


Figure 31
Clef de détermination des types de surfaces

LES GRANDS TYPES DE SURFACES ÉLÉMENTAIRES

Surface de type cultivé 1 : C1

Définition :

Surface cultivée dont la porosité vésiculaire est inférieure à 5 %. Cette surface correspond soit :

- à l'absence de croûte,
- à une croûte structurale 1 (ST1) dominante (1 seul microhorizon englobant des reliques d'agrégats).
(photos n° 106 et n° 107)

Ruissellement

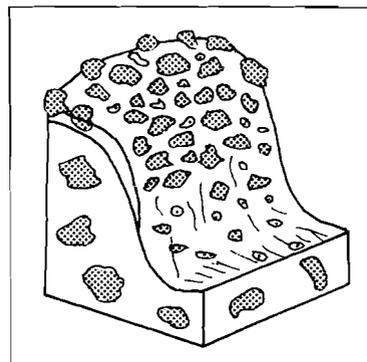
$$L_r = 0,2 Pu + 0,03 IK + 0,004 Pu IK - 3,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-75	80-90	75-85	15-25	25-30	5-15

Variantes :

Deux éléments "modulateurs" sont proposés : le couvert végétal et la charge grossière.



Si le couvert végétal excède 50 % de la surface (photo n° 108), les valeurs de l'infiltration deviennent :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
80-95	90-100	85-95	25-35	30-40	20-30

Si le taux d'éléments grossiers excède 40 % :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-50	55-65	45-55	7-15	5-15	1-5



photo 106.
 Surface cultivée en mil, sur dune, après la récolte, de type C1 modal, bassin versant de Gagara, Burkina Faso.



photo 107.
 Surface cultivée en mil, sur jupe sableuse, après la récolte, de type C1 modal, région de la mare d'Oursi, Burkina Faso.
 A noter : la faible couverture du sol assurée par les résidus de récolte et les pieds de mil.



photo 108.
 Surface cultivée en coton sur vertisol, de type C1 avec plus de 50% de couvert, bassin versant de Mouda, Cameroun.

Surface de type cultivé 2 : C2**Définition :**

Surface cultivée dont la porosité vésiculaire est comprise entre 5 et 30 %. En général, la croûte de ruissellement (RUI) couvre moins de surface que les croûtes de type ST1 ou ERO. Elle contient peu de vésicules (photo n° 109).

Ruissellement :

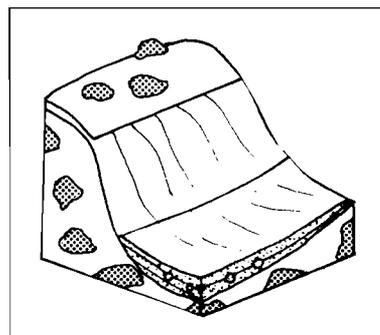
$$Lr = 0,35 Pu + 0,04 IK + 0,004 Pu IK - 3,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-60	60-80	50-70	1-7	8-15	2-4

Variantes :

Deux éléments "modulateurs" possibles : le microrelief et la texture.



Si le microrelief est fort ou si le degré d'obstruction au ruissellement est important (photos n° 110 et n° 111).

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-75	80-90	75-90	10-20	15-25	5-10

Si le sol est très argileux (> 40 % d'argile)

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
15-25	25-40	20-30	1-5	8-12	2-4

photo 109.
 Surface cultivée en maïs de type C2 modal,
 station de recherche de Misamfu, Zambie.
 A noter : la croûte structurale (ST1) au sommet
 des billons, une croûte d'érosion (ERO)
 peu développée sur leurs flancs
 et la croûte de ruissellement (RUI) entre les billons.
 Egalement : la structure et la porosité conservées
 sous la croûte structurale, à l'intérieur des billons.



photo 110.
 Surface cultivée en mil, sur sol ferrugineux
 à cuirasse développée à faible profondeur,
 de type C2 à fort microrelief
 et degré d'obstruction important
 (billons isohypses),
 bassin versant de Binndé, Burkina Faso.



photo 111.
 Surface cultivée en mil, sur sol hydromorphe,
 de type C2 à fort microrelief
 et degré d'obstruction important (buttes),
 bassin versant de Binndé, Burkina Faso.
 A noter : la croûte structurale (ST1) sur les buttes
 et la ségrégation du sable grossier
 sous l'effet du ruissellement (RUI).



Surface de type cultivé 3 : C3

Définition :

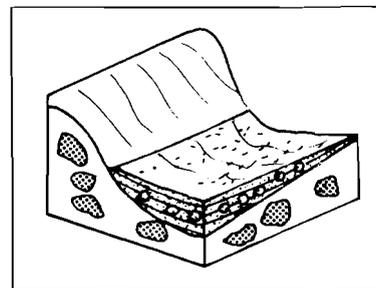
Surface cultivée dont la porosité vésiculaire est supérieure à 30 %. Cette surface est généralement associée à une croûte de ruissellement (RUI) dominante (photo n° 112).

Ruissellement :

$$L_r = 0,9 Pu + 0,05 IK + 0,002 Pu IK - 10,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
15-25	25-40	20-30	0-3	8-15	2-4



Variante :

Si le microrelief est fort ou le degré d'obstruction au ruissellement important

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-60	60-80	50-70	5-10	20-30	5-10

Surface de type Termites-vers : TV

Définition :

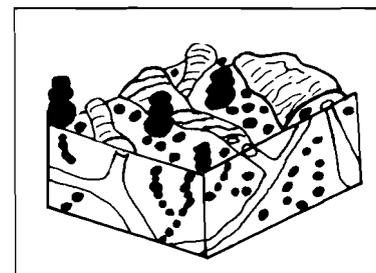
Surface non cultivée présentant au moins 20 % de turricules de vers et 30 % de placages de récolte de termites. Cette surface est toujours associée à un fort couvert végétal ou de résidus (photo n° 113).

Ruissellement :

$$L_r = 0,05 Pu + 0,01 IK + 0,001 Pu IK - 1,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
85-100	95-100	90-100	25-40	25-35	10-20



Variante néant

Surface de type Vers : V

Définition:

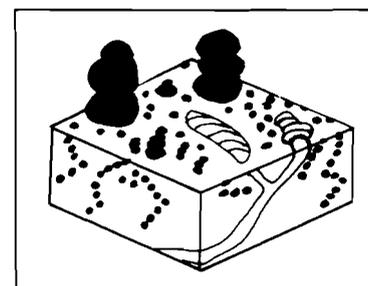
Surface non cultivée présentant au moins 20 % de turricules de vers et moins de 30 % de placage de récolte de termites (photos n° 7, n° 31 et n° 69).

Ruissellement :

$$L_r = 0,1 Pu + 0,05 IK + 0,002 Pu IK - 3,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
70-85	90-100	85-95	10-20	25-35	10-20



Variante : néant

photo 112.
 Surface cultivée en mil,
 sur sol ferrugineux gravillonneux,
 de type C3 modal,
 bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.
 A noter : la disparition complète
 des buttes de sarclage
 et la généralisation
 de la croûte de ruissellement (RUI).

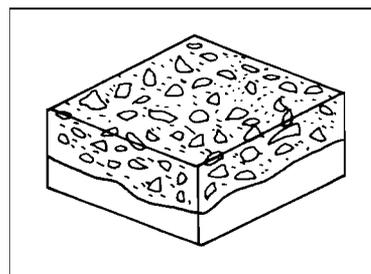


photo 113.
 Surface de type termites-vers modal (TV),
 bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.
 A noter : le fort couvert végétal.



Surface de type dessiccation : DES**Définition :**

Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, avec une croûte de dessiccation (DES), une croûte très peu développée, ou sans croûte. On trouve généralement ces surfaces sur les sols sableux associées à des couvertures végétales supérieures à 50 % (partie gauche de la photo n° 128).

**Ruissellement :**

$$Lr = 0,3 Pu + 0,01 IK + 0,003 Pu IK - 8,0$$

Infiltration :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-75	80-90	75-85	10-20	20-30	10-20

Variantes :

Si la couverture végétale est inférieure à 50 % (photos n° 114 et n° 115).

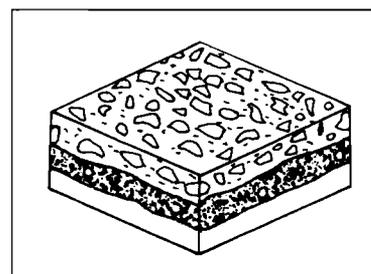
Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-50	60-70	50-60	5-10	10-20	1-5

Si la surface est située sur un sol sableux bouillant sur au moins 30 cm d'épaisseur (dune vive, par exemple).

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
85-100	90-100	90-100	> 30	> 30	> 20

Surface de type structurale 2 : ST2**Définition :**

Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte structurale à deux microhorizons -ST2- (sable grossier continu, légèrement pris en masse recouvrant une pellicule plasmique), (photos n° 59, n° 91 et n° 116).

**Ruissellement :**

$$Lr = 0,5 Pu + 0,02 IK + 0,004 Pu IK - 10,0$$

Infiltration :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-55	60-75	50-65	5-15	10-20	3-6

Variante :

Si la couverture végétale est supérieure à 50 % (photo n° 92).

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-70	80-90	75-85	10-20	20-30	5-10



photo 114.
 Surface piétinée, sans croûte,
 assimilée au type DES,
 avec couverture végétale inférieure à 50%,
 région d'Oursi, Burkina Faso.



photo 115.
 Surface de type DES,
 avec couverture végétale inférieure à 50%,
 bassin versant de Gagara, Burkina Faso.



photo 116.
 Surface de type ST2 modal,
 bassin versant de Gagara, Burkina Faso.

Surface de type structurale 3 : ST3**Définition :**

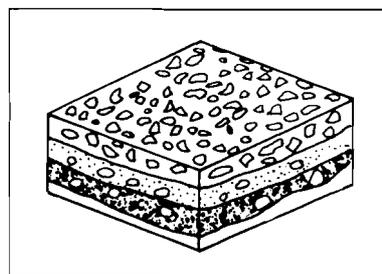
Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte structurale à trois microhorizons -ST3- (sable grossier libre sur du sable fin pris en masse reposant sur une pellicule plasmique, à forte porosité vésiculaire), (photos n° 87, n° 88, n° 93, n° 117 et n° 118).

Ruissellement :

$$L_r = 0,85 P_u + 0,01 I_K + 0,003 P_u I_K - 8,0$$

Infiltration :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
15-25	25-40	20-30	0-5	3-7	2-5

**Variante :**

Si la couverture végétale est supérieure à 50 % (photo n° 60) ou si cette surface recouvre un sol sableux (dune, placage)

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
45-55	60-70	55-65	10-15	10-15	5-10

Surface de type décantation : DEC**Définition :**

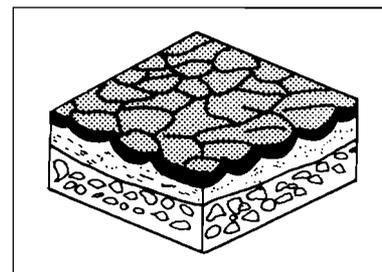
Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte de décantation -DEC-, reposant sur une surface réorganisée ou (et) sur un sol argileux (photos n° 75, n° 76, n° 77, n° 81, n° 82, n° 99 et n° 119).

Ruissellement :

$$L_r = 0,8 P_u + 0,08 I_K + 0,001 P_u I_K - 12,0$$

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
20-35	35-55	25-45	0-2	4-10	4-7

**Variante :**

Si la croûte de décantation recouvre une surface non réorganisée ou une croûte de dessiccation (surface de type DES).

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I_f mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
45-55	65-75	55-65	4-7	15-20	8-10



photo 117.
Surface de type ST3 modal,
sur sol hydromorphe en position de chanfrein,
bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.



photo 118.
Surface de type ST3 modal,
bassin versant de Gagara, Burkina Faso.
A noter : les microrides d'éolisation
laissent à penser que cette surface
est de type DES (croûtes de type EOL ou DES),
l'examen du microprofil montrant la succession
typique des trois microhorizons,
notamment une pellicule plasmique
à moins de 7 cm sous la parcelle,
implique toutefois un classement en ST3



photo 119.
Surface de type DEC modal,
sur sol argileux hydromorphe,
bassin versant de Gagara, Burkina Faso.
A noter : les squames caractéristiques
d'une croûte de type DEC.

Surface de type érosion : ERO**Définition :**

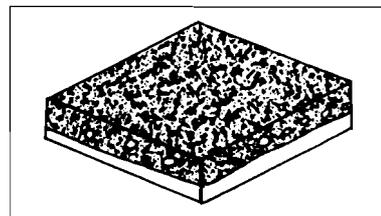
Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte d'érosion-ERO- (photos n° 52, n° 65, n° 80, n° 95, n° 96, n° 120, n° 128 et n° 171).

Ruissellement:

$$L_r = 0,95 Pu + 0,09 IK + 0,001 Pu IK - 9,0$$

Infiltration :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
10-20	15-30	10-25	0-2	2-6	0-5

**Variante :**

Si la croûte d'érosion recouvre un sol sableux (dune, placage sableux).

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
20-30	35-50	30-40	2-4	10-15	3-7

Surface de type grossier : G**Définition :**

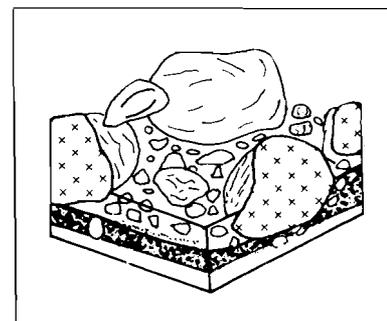
Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et plus de 40 % de charge grossière, les éléments grossiers étant enchâssés dans une croûte à 3 microhorizons (sable grossier, sable fin, pellicule plasmique), (photos n° 53, n° 64, n° 121 et n° 122 voir page 141).

Ruissellement :

$$L_r = 0,99 Pu + 0,05 IK + 0,001 Pu IK - 6,0$$

Infiltration :

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
5-15	5-20	3-15	0-2	1,5-5	0-3

**Variantes :**

Si la pellicule plasmique n'existe pas ou est discontinue.

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
15-30	20-35	15-25	3-5	5-10	0-5

Si la pellicule plasmique n'existe pas et si le taux de gravillons libres (non enchâssés dans la pellicule) excède 50 %, (photos n° 85 et n° 86)

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
30-40	50-60	35-50	7-12	10-15	3-7

S'il n'y a pas de réorganisations en surface (uniquement gravillons libres)

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
50-70	70-80	60-75	10-20	15-25	10-20

Si le sol est issu de roches vertes (fort couvert végétal et très peu de croûtes), (photo n° 123)

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I _l mm.h ⁻¹	Pis mm	Pih mm
85-100	90-100	85-95	20-30	10-20	5-15



photo 120.
Surface de type ERO modal,
région d'Oursi, Burkina Faso.



photo 121.
Surface de type G modal, en position de piémont,
bassin versant de Banigorou, Niger.
A noter : l'abondance des gravillons
inclus dans la croûte de type G.

VALIDATION DE LA MÉTHODE

Les différents types de surface présentés dans les fiches du paragraphe précédent, ainsi que les valeurs hydrodynamiques, ont été déterminés à partir des mesures réalisées sur 77 parcelles du Burkina Faso et du Niger.

Afin de vérifier le bien fondé de la typologie des états de surface, nous l'avons testé sur 22 parcelles étudiées sous pluies simulées à l'occasion d'autres études. Ces parcelles n'ont pas été utilisées dans la définition des types et des valeurs hydrodynamiques associées. Elles sont réparties sur une vaste zone géographique puisque

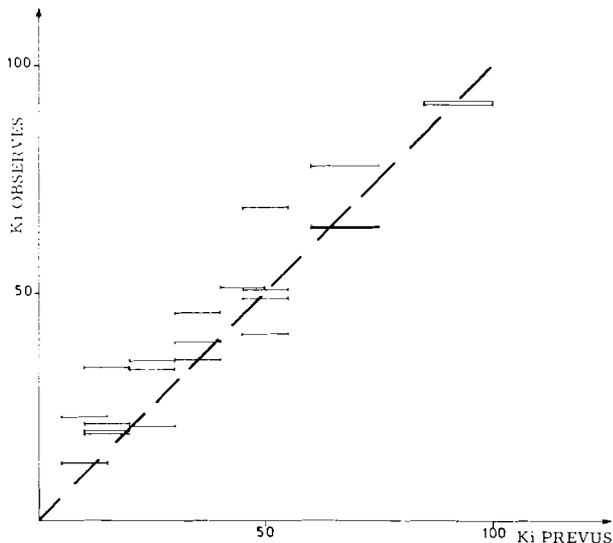


Figure 32
Reconstitution des K_i à partir des types de surface

3 sont situées à Agadez (Niger), 7 à Oursi (nord du Burkina Faso) et 12 à Mouda (Nord-Cameroun). Les protocoles et les formes des pluies simulées sur ces parcelles sont très différents des nôtres, ce qui peut expliquer certains écarts, particulièrement au niveau des P_i qui sont très dépendants de l'intensité de la pluie. Le test portera surtout sur les valeurs de K_i .

Pour 22 parcelles, 13 valeurs de K_i se situent dans l'intervalle prévu. Pour 5 autres parcelles, l'écart entre le K_i correspondant au type de surface et le K_i mesuré est inférieur à 5%. On peut donc estimer que la prédiction est fidèle pour 18 parcelles sur 22, soit 82% de l'échantillon (fig.32). Pour les 4 valeurs de K_i mal reconstituées, les écarts entre K_i prévus et K_i observés sont de 8, 14, 14 et 17%.

Pour les valeurs de I_f , 14 appartiennent à l'intervalle prévu ou en sont peu éloignées, soit 64% de l'échantillon. P_i n'est correctement prévu que pour 55% de l'échantillon mais P_{ih} l'est pour 73% des valeurs, l'influence de l'intensité de la pluie étant moindre pour un sol saturé que pour un sol sec.

Nous avons également testé la typologie sur des parcelles situées en zone soudanienne :

- 11, sur le bassin de IDENWOUH, nord du Togo, pluviométrie annuelle de 1.225 mm,
- 6, sur le bassin de NADJOUNDI, nord du Togo, pluviométrie moyenne annuelle de 1.070 mm,
- 8, sur le bassin de VARALE, nord de la Côte d'Ivoire, pluviométrie moyenne annuelle de 1150 mm.

Pour ces 25 parcelles, 16 valeurs de K_i sont dans l'intervalle prévu et 3 sont à moins de 5% des limites de cet intervalle (76% de l'échantillon). I_f est correctement prévu pour 53% de l'échantillon, P_i pour 36% et P_{ih} pour 76%.



photo 122.
 Surface de type G modal,
 reg sur paléosol (solonetz solodisé),
 bassin versant d'Agassaghas, Niger.
 A noter : l'abondance des cailloux (galets)
 inclus dans la croûte de type G.



photo 123.
 Surface de type G, sur roches vertes,
 bassin versant de Mouda, Cameroun.

EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TYPOLOGIE : CALAGE D'UN MODÈLE AGROCLIMATOLOGIQUE

Pour cet exemple, nous avons choisi le modèle BIP, développé par l'IRAT (FOREST, 1984). Ce modèle qui simule le bilan hydrique d'une culture pluviale, intègre une fonction simple du ruissellement qui est fondée sur deux critères : la texture et la technique culturale. On remarque, déjà, que les états de surface, dont nous avons vu qu'ils sont les facteurs quasi-exclusifs du ruissellement et de l'infiltration, dans la zone semi-aride, ne sont pas pris en compte dans ce modèle.

En fonction de la texture et de la technique culturale, l'auteur donne des valeurs de la pluie d'imbibition et du coefficient de ruissellement qui sont les deux paramètres de la fonction du ruissellement (tableau 6).

Tableau 6
Critères de simulation du ruissellement
(FOREST, 1984)

Texture Technique culturale	Sablo-argileux	Argileux
Non travaillé ou travail très superficiel	Pi=20 mm Kr=30 %	Pi=10 mm Kr=40 %
Sol labouré	Pi=30 mm Kr=10 %	Pi=20 mm Kr=20 %

On peut noter que la texture sableuse est absente de ce tableau. L'auteur considère que pour cette texture, la totalité de la pluie s'infiltré. Nos mesures sous pluies simulées ont montré que pour certaines surfaces élémentaires développées sur des sols sableux, le coefficient de ruissellement peut dépasser 50 %.

Nous venons de voir qu'il est possible de distinguer parmi les surfaces cultivées trois grands types en fonction de l'abondance des vésicules :

- **Surface de type C1** : Porosité vésiculaire absente ou très faible (<5 %), avec 2 variantes :
 - Couvert végétal >50 %,
 - Taux d'éléments grossiers en surface >40 %.
- **Surface de type C2** : Porosité vésiculaire peu abondante (5 à 30 %), avec 2 variantes :
 - fort microrelief ou degré d'obstruction au ruissellement important,
 - sol très argileux (taux d'argile > 30%).

- **Surface de type C3** : Porosité vésiculaire forte (>30 %), avec une variante :

- Fort microrelief ou degré d'obstruction au ruissellement important.

Pour chacun de ces types, on peut déduire des fiches précédentes (§5, chapitre 15) des valeurs des coefficients de ruissellement pour un sol sec Kr0 (IK = 0) ou un sol très humecté Kr20 (IK = 20), et de la pluie d'imbibition pour un sol sec, Pis, ou un sol quasi-saturé, Pih. Notons que du fait de l'impossibilité de tester sur nos parcelles de taille réduite des pratiques culturales à très fort microrelief, ces valeurs correspondent à des sols généralement peu travaillés (travail à plat et, dans une moindre mesure, billonnage et buttage). On trouvera dans le tableau 7, ces valeurs pour chaque type de surface et les différentes variantes.

Tableau 7
Caractéristiques du ruissellement pour des sols cultivés

Type de surface	Variante	Kr0 %	Kr20 %	Pis. mm	Pih. mm
C1	modal végétation>50% éléments grossiers>40%	10-20	15-25	25-30	5-15
		0-10	5-15	30-40	20-30
C2	modal fort microrelief argile>30%	20-40	30-50	8-12	2-4
		10-20	10-25	15-25	5-10
		60-75	70-80	8-12	2-4
C3	modal fort microrelief	60-75	70-80	8-15	2-4
		20-40	30-50	20-30	5-10

On remarquera que ces valeurs sont assez éloignées de celles données par FOREST. Pour un sol argileux peu travaillé, par exemple, la valeur du coefficient de ruissellement Kr utilisée dans le modèle BIP est de 40 %, alors que pour une surface de type C2 elle serait de l'ordre de 70 %. De même, pour un sol sablo-argileux peu travaillé, si la valeur de Kr du modèle est compatible avec une surface de type C2 modal, elle est surestimée pour une surface de type C1, et fortement sous estimée pour une surface de type C3, or une surface de type C3 est relativement courante sur un sol de cette nature.

Il est évident que les "performances" du modèle, qui calcule l'évapotranspiration réelle et la compare aux besoins en eau des cultures, pour définir un indice de

satisfaction des besoins en eau, sont fortement influencées par les valeurs de Kr et Pi. A titre d'exemple, nous avons utilisé ce modèle, pour une variété de mil 90 jours, en introduisant la pluviométrie journalière de Niamey des années 1905 à 1982, une première fois avec les valeurs standard définies par FOREST pour un sol argileux travaillé de façon superficielle, et une seconde fois en utilisant la fonction de production du ruissellement déterminée sur la parcelle 7 du bassin de Kountkouzout (Niger) qui correspond au même type de sol et à la même pratique culturale.

Dans le premier cas, le coefficient moyen de satisfaction pour la période est de 0,63 alors que dans le

second, il tombe à 0,40. Encore, avons-nous utilisé une surface dont les valeurs du ruissellement sont assez voisines de celles du modèle, avec une parcelle de type C3 modal, l'écart aurait été beaucoup plus important.

L'auteur du modèle était, d'ailleurs, tout à fait conscient de l'imprécision des valeurs du ruissellement qu'il donnait puisqu'il indiquait : "Lorsque l'utilisateur dispose d'un référentiel plus précis, il peut redéfinir, lui-même, la grille de sélection des valeurs Pi et Kr...". Un tel référentiel, à notre connaissance, n'existait pas jusqu'à présent. Nous espérons avoir, au moins partiellement, comblé cette lacune pour la zone semi-aride ouest-africaine.

**LES VARIATIONS DANS L'ESPACE
ET DANS LE TEMPS**

LA MÉTHODE CARTOGRAPHIQUE

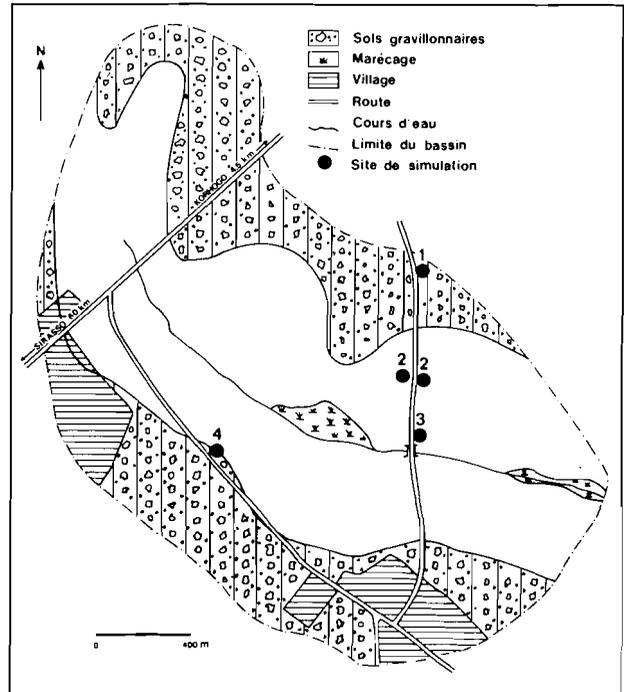
INTRODUCTION

La cartographie des états de surface diffère de celle des organisations internes de la couverture pédologique par l'objet d'étude, mais s'en écarte peu dans ses grands principes : travaux de terrain et représentation cartographique.

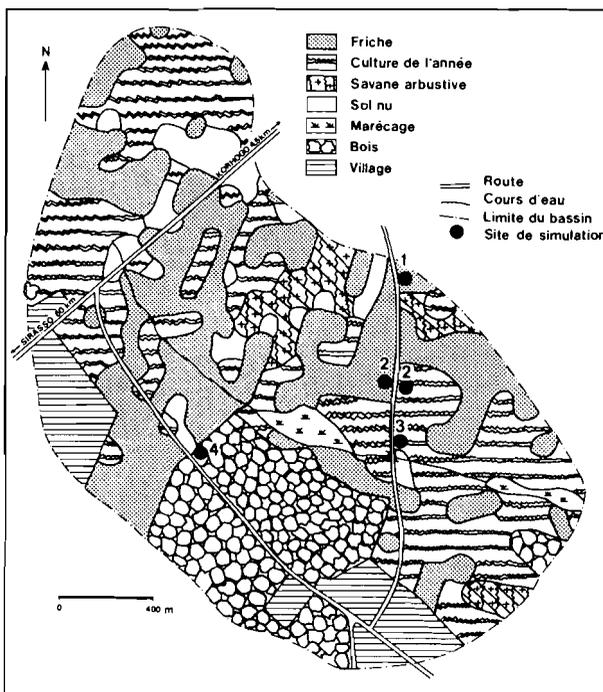
Il convient de distinguer deux voies possibles :

- **L'approche systématique :**

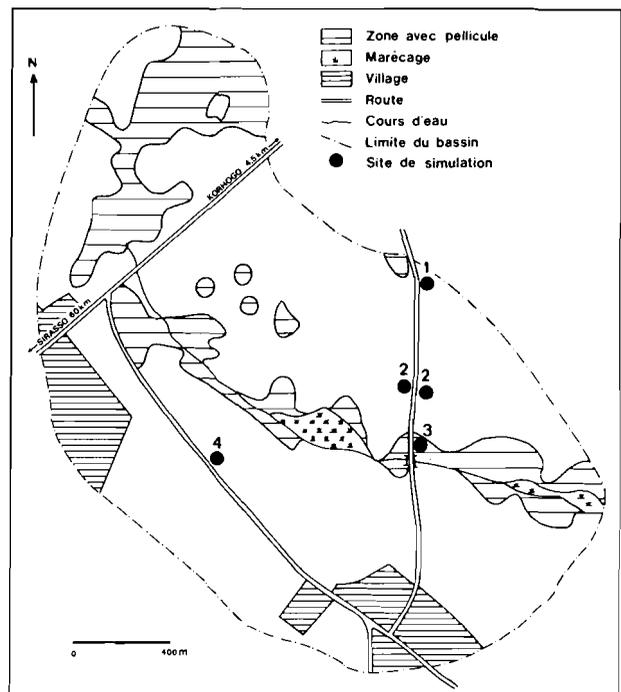
elle consiste à décrire le milieu selon un maillage rigide. Elle réclame du temps, mais peu d'expérience. Elle permet d'acquérir des données fiables sans grand risque d'erreur. Cette méthode s'avère indispensable lorsque l'on souhaite disposer de la carte du parcellaire actuel, en l'absence de photographies aériennes récentes (carte n° 7, GIODA 1983). La densité des observations rend également possible la réalisation de plusieurs cartes thématiques, précieuses pour la modélisation du ruissellement à l'échelle du bassin à partir des données de simulation de pluie,



Carte 7b. Affleurements gravillonnaires



Carte 7a. Occupation des sols



Carte 7c. Organisations pelliculaires superficielles

Carte 7

Exemple de cartographie par levé systématique. Maille de 10 m x 100 m.
Bassin de Waraniene ; Korhogo, Côte d'Ivoire. (d'après GIODA, 1983)

● **L'approche par échantillonnage :**

cette méthode est commune à la plupart des naturalistes. Elle est plus rapide que la précédente, mais requiert une certaine technicité. Elle nécessite une initiation qui, comme nous le verrons, peut s'acquérir rapidement. C'est cette méthode que nous présentons ici.

LES MODALITÉS DE RÉALISATION

Les relevés de terrain

Depuis les premiers travaux menés dans le nord du Burkina Faso (VALENTIN, 1981b), les techniques de relevé ont eu tendance à se normaliser. Il reste néanmoins que la méthode est suffisamment souple pour s'adapter aux différentes conditions de milieu, d'accessibilité, et en fonction de l'existence ou non de photographies aériennes. Ainsi la prospection différera en zone sahélienne où elle peut s'opérer en véhicule tout terrain et en région de savane humide où l'ouverture de layons, à parcourir à pied, est nécessaire. En l'absence de photographies aériennes récentes et de bonne qualité, la prospection s'effectue selon une densité plus forte de toposéquences qui permettent d'établir d'éventuelles relations entre les états de surface et la topographie. Dans tous les cas, le cheminement s'accompagne du relevé des discontinuités d'états de surface, et d'une description systématique de points d'observation le plus souvent distribués selon des intervalles réguliers.

La densité de ces points varie en fonction de la qualité des "documents accessoires" : photographies aériennes, carte topographique détaillée, etc..., du type de paysage : son degré de mise en culture, la couverture végétale, etc... et de "l'équation personnelle du cartographe" : un pédologue spécialiste des états de surface aura besoin d'un nombre plus restreint d'observations qu'un débutant. Ces trois variables (Documents x Nature x Homme) ont permis à BOULAIN (1966) de définir "l'efficacité pédologique" : c'est "dans une région donnée, le nombre qui traduit les gains de temps ou les économies d'observation et d'analyses dues à l'emploi des méthodes de la pédologie moderne dans l'inventaire des sols par rapport à la méthode qui consiste uniquement à décrire et analyser les sols et à faire une carte par interpolation ... Cette efficacité est égale à 1 en zone forestière tropicale sans carte topographique précise et même avec des photos aériennes ordinaires. Par contre, elle est de l'ordre de 20 en zone non couverte de végétation ondulée, avec des photographies en noir ou un plan très détaillé en courbes de niveau au 1/10 000, dans certaines régions méditerranéennes et si les photographies ont été prises au mois d'octobre ou de novembre". MAIGNIEN (1969) précise que la méthode de levé systématique requiert 4

observations par cm². Un bassin de 25 km², cartographié à 1/50.000 nécessiterait 400 observations. L'efficacité pédologique permet de réduire ce nombre à 20, dans le meilleur des cas. Pour les cartes d'états de surface, nous considérons que l'efficacité varie selon les différentes variables (Documents x Nature x Homme) entre 5 et 20.

Passant à une échelle supérieure à celle de la surface élémentaire, il est nécessaire d'introduire, en sus des variables déjà présentées au chapitre 14, d'autres paramètres.

Le couvert végétal

Quelques définitions:

● **Les strates**

Une strate est composée d'un "ensemble de plantes qui, au sein d'un groupement, sont de taille et/ou d'aspect physiognomique semblable"(A.C.C.T.,1978a). "Chaque strate est repérée par le niveau modal de densité maximale du feuillage et non par le niveau de son toit" (INFORMATIQUE ET BIOSPHERE, 1971). Ainsi distingue-t-on généralement (A.C.C.T., 1978a) :

- la strate arborée : constituée de plantes ligneuses ayant un tronc distinct et de grande taille (plus de 5-8 m de haut), (photos n° 124 et n° 125)
- la strate arbustive : seule diffère de la définition précédente la taille qui est inférieure à 5-8 m,
- la strate herbacée : les plantes ne présentent pas de structures ligneuses pérennes,
- le tapis végétal : ensemble de végétaux bas, souvent des herbes ou des mousses. Il est parfois désigné par le terme de "végétation de surface".

● **Le recouvrement**

Il s'agit du pourcentage de surface occupée par la projection verticale du couvert végétal sur le sol. On distingue :

- le recouvrement par strate dont la somme peut excéder 100%,
- le recouvrement global qui concerne l'ensemble des parties aériennes, y compris le tapis végétal.,
- le recouvrement total qui comprend le recouvrement global et celui assuré par les résidus végétaux. Son complément à 100 représente le pourcentage de sol nu, directement exposé à l'impact des pluies.

● **Le type de formation végétale**

La combinaison des strates et de leur densité permet de définir 10 types de formations végétales (A.C.C.T., 1978a ; MAIGNIEN 1980) :

- 1 ligneuse haute dense : seule la strate arborée est d'une importance significative et son recouvrement dépasse 75%,
- 2 ligneuse haute : recouvrement de la strate arborée compris entre 25 et 75%,



photo 124.
Adansonia digitata L. (baobab), Tatki, Ferlo, Sénégal.
 A noter : les différentes strates arborées
 et arbustives.

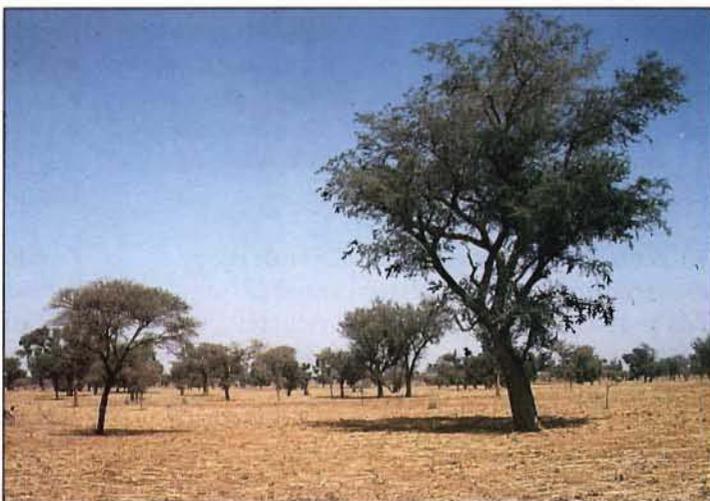


photo 125.
 Culture de mil sous *Acacia albida* Del. ("parc à Acacia"),
 région de Sabouna, Burkina Faso.
 A noter : la présence de la seule strate arborée.

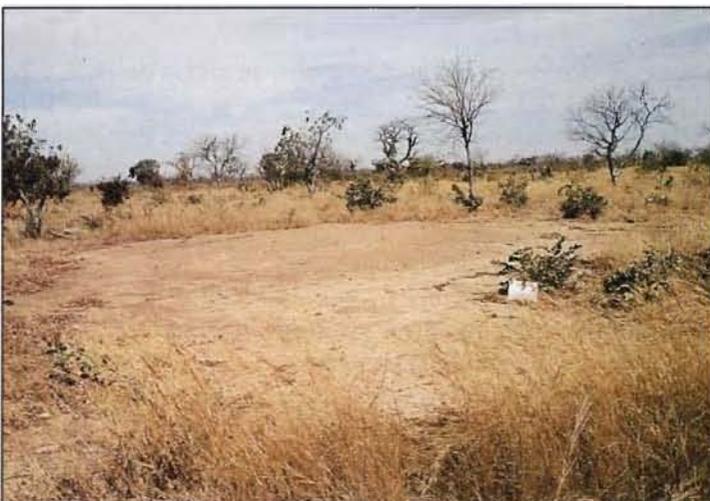


photo 126.
 Termitière érodée,
 bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.
 A noter : la dénudation du cône d'érosion,
 facilement repérable sur photographies aériennes.

- 3 ligneuse haute claire : recouvrement de la strate arborée inférieur à 25%,
- 4 ligneuse haute et basse,
- 5 ligneuse basse : par exemple, un "bush", c'est-à-dire une forêt basse constituée d'arbustes, dépourvue de tapis graminéen continu en sous-bois,
- 6 herbacée et ligneuse haute : par exemple la savane forestière,
- 7 herbacée et ligneuse haute et basse : par exemple, une galerie forestière,
- 8 herbacée et ligneuse basse : par exemple, une steppe arbustive,
- 9 herbacée : par exemple, une prairie marécageuse, ou une steppe désertique,
- 10 à végétation très claire : le recouvrement total est inférieur à 20%.

Les critères retenus:

Il est difficile d'établir *a priori* la hiérarchie des critères à prendre en compte. En outre, certaines contingences viennent parfois réduire le temps disponible aux relevés, enlevant dès lors toute possibilité d'entreprendre des descriptions complètes. Dans ces conditions, il est intéressant de disposer d'une liste abrégée des variables indispensables qui, dans la liste suivante, seront précédées d'un astérisque (*)

● Le couvert arboré

Pour chacune des strates, on s'efforce de noter :

- le recouvrement (%), estimation visuelle,
- la distance moyenne entre les individus (m),
- les espèces dominantes ou significatives,

Pour l'ensemble du couvert arboré :

- * le recouvrement global (%), estimation visuelle,
- toute remarque qui paraît utile : traces de brûlis, ébranchages, état des ligneux (vigoureux, chétifs, morts), ...

● Le couvert herbacé ou cultural

- Le recouvrement (%), estimation visuelle,
- Le type de couvert herbacé ou cultural : en individus isolés ou en touffes.
- Le diamètre moyen des touffes, évalué au niveau de la couronne (m),
- La distance moyenne entre les individus ou entre les touffes (m). Dans le cas d'un champ, de mil par exemple, cette distance entre les pieds doit être appréciée selon les deux directions : le long des lignes de semis, et entre les lignes.
- La distance maximum entre les individus et les touffes (m). Ce paramètre permet d'évaluer le diamètre de la zone nue la plus grande.
- Les relations entre les caractères de ce couvert et les autres composantes de la surface élémentaire : les touffes peuvent être associées, par exemple, à un voile sableux, à une concentration de turricules de vers, ...

■ L'espèce dominante et les espèces secondaires,

● Le tapis végétal

- Le recouvrement (%), estimé visuellement, de l'ensemble des végétaux de surface : plantes rampantes, mousses, graines ou jeunes pousses. La présence d'algues ou de lichens doit être signalée mais leur part de surface ne doit pas être comptabilisée dans le recouvrement du tapis végétal.

● Les résidus végétaux

- Le recouvrement (%) estimé visuellement de l'ensemble des résidus végétaux (ou de récolte).
- Leur nature : brindilles, écorces, feuilles, pailles, tiges de mil, ...
- La position : résidus dressés (cas des herbes mortes en place), inclinés (cas des herbes mortes piétinées), ou à terre.
- L'épaisseur (cm) : lorsque les débris végétaux constituent un paillage ("mulch" en anglais).
- Le degré de décomposition : non décomposés, peu décomposés, décomposés.

● L'ensemble du couvert

- Le recouvrement total (%), estimé visuellement.
- Le type de formation végétale.

La surface sensu stricto

Le relief

Nous distinguerons :

● Le mésorelief

Il concerne les modelés d'amplitude supérieure à 50 cm, on en note :

- le type : termitière, bombement, dépression, pointement rocheux ou de cuirasse, ravine, ...
- le diamètre basal (pour les formes plus ou moins circulaires comme les termitières- photo n° 126), ou largeur (pour les formes linéaires comme les ravines), en cm.
- * la hauteur (ou profondeur), en cm.
- la distance moyenne entre deux formes du même type (m).
- le degré d'obstruction au ruissellement : cf. chapitre 14, §3.

● Le microrelief

Son amplitude varie entre 5 et 50 cm, on en précise :

- Le type : chicot de cuirasse, jeune termitière (ou "termitières champignons"), terrier, petites buttes au pied des touffes, micro-dune, voile sableux, relief "gilgai", ravineau ou rigole d'érosion. Sur les parcelles cultivées : buttes, billons, billons cloisonnés, labour, planche, ...
- Le diamètre basal ou largeur, en cm.
- La hauteur (ou profondeur), en cm.
- La distance moyenne entre deux formes du même type (m).

- Le degré d'obstruction : (cf. plus haut) il est par exemple maximal pour des billons cloisonnés, encore très fort pour des billons isohypses (perpendiculaires au sens de la pente).
- **Le nanorelief**
D'une amplitude inférieure à 5 cm, on en spécifie :
 - le type : microrides d'éolisation, traces d'impact de gouttes de pluies (microcratères), micropiédestaux, micromarches d'érosion en nappe, piétinements, protogriffes d'érosion linéaire, fentes, ...
 - le diamètre basal ou largeur, en cm.
 - la hauteur (ou profondeur), en cm.
 - la distance moyenne entre deux formes du même type (cm),
 - le dessin, en particulier pour les fentes : en réseau polygonal (longueur moyenne d'un côté, en cm), en stries, en bandes, ...

L'érosion

A partir des relevés précédents, il est possible d'identifier le type d'érosion et son intensité :

- Type : érosion éolienne (qui se manifeste par la présence de microrides d'éolisation), par rejaillissement (microcratères, micropiédestaux), en nappe (micromarche), linéaire (protogriffes, griffes - photo n° 127, ravineaux) et des dépôts sableux signalent une érosion en nappe,
- Intensité : il est pratique d'utiliser l'échelle suivante :
 - nulle : pas de traces d'érosion
 - faible : seulement des microcratères et/ou des micropiédestaux,
 - modérée : des dépôts sableux signalent une érosion en nappe,
 - forte : micromarche (photo n° 168) et/ou protogriffes,
 - très forte : griffes, ravineaux, ravines (photos n° 144, n° 171 et n° 172)

Activité faunique et microhorizons :

Pour la description de ces paramètres, on se reportera au chapitre 14, §4 et 5.

Les relations entre surfaces élémentaires

Les pourcentages respectifs d'occupation

Etant donné qu'une unité cartographique se trouve constituée le plus souvent de plusieurs surfaces élémentaires, il convient d'en estimer visuellement les pourcentages respectifs d'occupation. Comme pour les données du recouvrement, les planches présentées en annexe peuvent être utilisées pour étalonner son échelle d'appréciation.

Les types de limites

Comme pour les limites verticales (chapitre 14, § 5.2.4), la transition entre les surfaces élémentaires peut être :

- abrupte : pour un contact direct,
- nette : la transition est inférieure à 5 cm (photo n° 128),
- distincte : transition de 5 à 10 cm,
- graduelle : transition de 10 cm à 1 m,
- progressive : transition supérieure à 1 m.

Distribution relative et organisation générale

La distribution relative des surfaces élémentaires revêt une grande importance du point de vue de :

- **L'identification des unités** : par exemple, une brousse tigrée (photos n° 130 et 131) se caractérise d'abord par la distribution en bandes de ses surfaces élémentaires.
- L'étude des *dynamiques évolutives* : la simple analyse de la distribution relative des surfaces élémentaires peut renseigner sur le sens d'une évolution.
- **L'hydrodynamique** : des pourcentages identiques de surfaces élémentaires peuvent correspondre à des comportements très différents. Par exemple, l'alternance de bandes enherbées et de surfaces nues produit moins de ruissellement si elle est isohypse que disposée dans le sens de la pente.

En pratique, le descripteur s'efforce, pour chaque unité, de préciser le type de distribution des surfaces élémentaires, au besoin sous la forme d'un schéma. Celui-ci met en lumière, le cas échéant, le motif élémentaire et son mode de reproduction dans l'espace : en damiers, en îlots aléatoires, en couronnes,

Représentation cartographique

Mise en ordre des relevés

La représentation cartographique nécessite d'identifier des unités définies en fonction des caractéristiques communes à plusieurs points d'observation. La première phase consiste à établir un fichier de ces différents points et de leurs caractères (chapitre 14, §8). Il est alors possible de procéder à un premier regroupement des points les plus semblables. Cette opération pourrait éventuellement être automatisée : une analyse en composantes principales doit être à même de faciliter l'identification de ces groupes. Le nombre de ces derniers est le plus souvent incompatible avec une représentation cartographique simple. Les unités seraient généralement trop petites pour être dessinées aux échelles habituelles (1/50.000 ou 1/30.000). Il convient par conséquent, de condenser encore l'information en associant plusieurs groupes au sein de la même unité.

Définition des unités cartographiques

La représentation cartographique répond à deux impératifs en termes de :

● **Contenu** : chaque unité cartographique doit être définie en fonction des surfaces élémentaires qui la composent et des pourcentages occupés par ces surfaces. Pour hiérarchiser les facteurs et définir ainsi les unités, il est nécessaire, contrairement à la phase de terrain, de recourir à l'état actuel de nos connaissances sur les relations entre les différentes composantes du milieu et l'aptitude au ruissellement. En zone semi-aride, les regroupements s'effectueront en privilégiant les organisations pédologiques superficielles alors que ce sont les types de peuplements végétaux qui différencieront, par exemple, les unités en savane humide.

● **Limites** : le tracé doit être possible à partir des seuls documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, ... Il se trouve souvent facilité par les relations génétiques, ou simplement topographiques, des différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, la distribution des états de surface est ordonnée. La mise en évidence d'un tel ordre, et son éventuelle compréhension, limitent considérablement les risques d'erreur, surtout lorsque l'on ne dispose pas de photographies aériennes. Elles fournissent également des renseignements sur la dynamique actuelle des versants.

Lorsque la photo-interprétation est possible, il est nécessaire de s'imposer certaines règles rigoureuses : à chaque point d'observation, reporté sur un calque, correspond un type de grisé sur la photographie aérienne. Celui-ci se définit non seulement par sa teinte mais aussi par d'autres variables comme la présence de points blancs (termitières épigées érodées - ZONNEVELD, LEEUW et SOMBROEK, 1971, ou taches nues) ou noirs (arbres) ... Les relations établies ainsi entre les points d'observations (puis les unités) et les types de grisé doivent être bien établies et si possible énoncées sur un tableau. Cette "clef" d'interprétation permet de dresser le document cartographique. Assez souvent, il s'agit d'une esquisse et non d'une carte proprement dite. En effet, l'hétérogénéité des unités est souvent comparable à celle d'une carte de sols à petite échelle (par exemple à 1/200.000) dans la mesure où il s'agit de la représentation cartographique d'associations. Pour des études à grande échelle (par exemple à 1/5.000), il serait intéressant de fournir un document où seraient reportées non pas des unités, mais des lignes d'isodifférenciation. Il serait alors possible de mettre en évidence les éventuels décalages entre couvert végétal et organisations pédologiques superficielles.

Choix des sites expérimentaux

La dernière phase de ce travail consiste à déterminer l'emplacement d'un nombre limité de parcelles expérimentales. L'échelle des mesures (1 m²) est celle des

"surfaces élémentaires" (cf. *supra*). Il est nécessaire de dresser la liste des différentes surfaces élémentaires constitutives des unités. Il arrive, par exemple en zone sahélienne, que le nombre de surfaces élémentaires soit inférieur au nombre d'unités cartographiques. Un nombre limité de parcelles (entre 10 et 15), réparties sur plusieurs sites permet alors de tester l'ensemble des situations.

La représentativité de chaque parcelle est établie en multipliant le pourcentage d'occupation de la surface élémentaire correspondante au sein de l'unité, par le pourcentage d'occupation de cette unité dans le bassin versant. C'est cette donnée qui est ensuite utilisée dans le modèle hydrologique. Parfois, des contraintes d'ordre pratique (durée de campagne de simulation de pluie, inaccessibilité de certaines zones du bassin, ...) imposent un nombre de parcelles inférieur au nombre des surfaces élémentaires. On s'efforce alors de procéder à de nouveaux regroupements d'unités, ou lorsqu'une telle opération s'avérerait contestable, la priorité est donnée aux surfaces élémentaires les plus représentées.

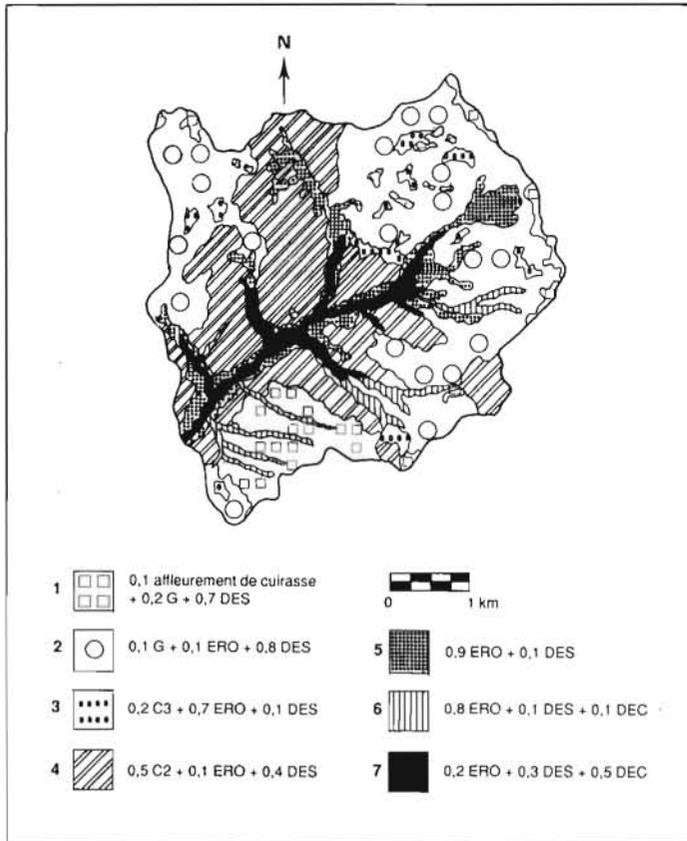
Un site expérimental compte entre 2 et 5 parcelles, en fonction du nombre de surfaces élémentaires à tester dans l'unité.

EXEMPLE : LE BASSIN DE BOULSA-KOGNERE (BURKINA-FASO)

De dimensions réduites, 19,8 km², le bassin de KOGNERE est situé sur le plateau mossi, au nord-ouest de Ouagadougou. Le substrat géologique est essentiellement constitué de granites à biotite. DUBREUIL et al., (1972) signalent qu'une note pédologique rédigée à l'occasion de l'étude de ce bassin à la fin des années cinquante indique la présence :

- de sols ferrugineux tropicaux généralement indurés en cuirasse,
- de sols hydromorphes (à hydromorphie temporaire) argileux,
- d'alluvions graveleuses en provenance des glaciais.

Lors de la prospection de terrain menée en début de saison sèche (décembre) à l'occasion d'une campagne de simulation de pluies, 54 points d'observations ont été décrits, le long d'un cheminement de 13 km. Ces points ont ensuite été regroupés selon 7 unités (carte n° 8). Comme l'indique la légende, les principaux critères retenus pour la définition des unités sont des paramètres d'états de surface : granulométrie des organisations superficielles, affleurement de cuirasse, hydromorphie de surface, présence de termitières (facilement identifiées sur photographies aériennes).



Carte n° 8
 Carte des états de surface du bassin de Kogneré,
 Burkina Faso. (d'après VALENTIN, 1985)

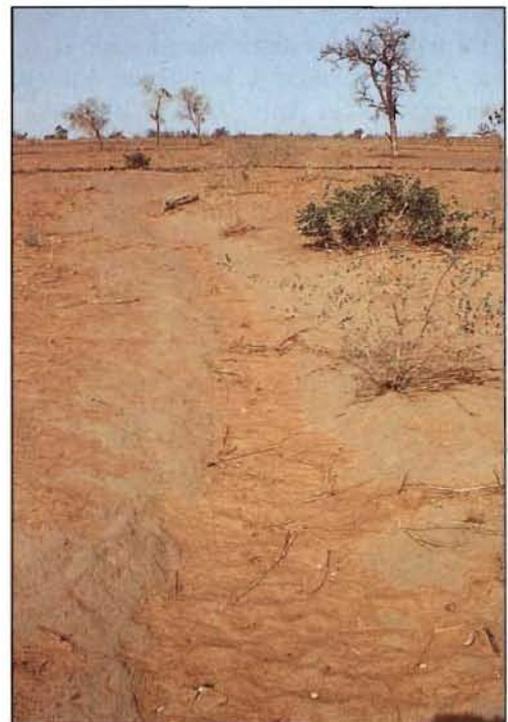


photo 127.
 Griffes d'érosion,
 bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
 A noter : la croûte de ruissellement (RUI) dans la griffe
 et la croûte d'érosion (ERO) de part et d'autre.



photo 128.
 Limite entre une croûte d'érosion (ERO)
 sur sol halomorphe ("hardé")
 et une croûte de dessiccation (DES)
 sur une microbutte sableuse,
 région de Maroua, Cameroun.
 A noter : les nombreux placages de récolte
 de termites sur les résidus végétaux.

LA REPRODUCTIBILITÉ DE LA MÉTHODE

La démarche qui vient d'être brièvement présentée semble avoir acquis une fiabilité suffisante pour être diffusée. Un premier essai a récemment été tenté dans cette voie. Un petit bassin versant sahélien (GAGARA-EST), situé au nord du Burkina Faso, a été cartographié par quelqu'un (A), déjà rompu à la méthode, et par une personne inexpérimentée (B). Les travaux de terrain ont été menés conjointement et la clef de photo-interprétation a été fournie à (B).

Le tableau n° 8 permet la comparaison des pourcentages d'occupation des 7 unités retenues (après regroupement) établis à partir des deux documents dressés indépendamment.

Il apparaît deux distorsions (unités 6 et 7), de l'ordre de 7 %, qui résultent de la difficulté d'identification de surfaces érodées (unité 7). Pour les autres unités, les

Tableau 8

Comparaison des pourcentages d'occupation des unités cartographiques d'un petit bassin sahélien établis par quelqu'un formé à la technique (A) et quelqu'un d'inexpérimenté (B).

Individu	Surface du bassin (km ²)	unités						
		1	2	3	4	5	6	7
B	31,3	9,8	11,4	10,2	17,4	28,4	3,0	19,8
A	30,4	10,7	11,7	11,1	17,3	26,3	10,3	12,7

écarts sont réduits, du moins au regard de la précision escomptée. Cet essai d'initiation à cette technique de cartographie des états de surfaces a été jugé suffisamment démonstratif pour qu'elle soit largement diffusée et appliquée sur de nombreux autres bassins versants (JANEAU, 1985, 1986 ; IRIS, 1985).

L'EXTENSION SPATIALE : INTÉRÊT ET LIMITES DE LA TÉLÉDÉTECTION

INTRODUCTION

Si, comme nous venons de le voir, il est possible, à partir d'une description du milieu, de dresser la carte des états de surface d'un petit bassin versant, cette méthode, pour répondre aux besoins des hydrologues doit encore être :

- extensible, pour pouvoir, à partir d'une zone test servant de "vérité terrain", établir la carte des états de surface de bassins dont la superficie dépasse 50 km², pour lesquels le temps et donc les coûts nécessaires aux relevés de terrain deviennent prohibitifs ;
- transposable, afin de cartographier un bassin pour lequel on ne dispose d'aucun relevé. L'utilisation des images satellitaires paraissait, *a priori*, suffisamment séduisante pour tenter de résoudre ces deux problèmes.

EXTENSION CARTOGRAPHIQUE : L'EXEMPLE D'OURSIS

Les bassins versants de la Mare d'Oursi, situés au nord du Burkina-Faso, ont fait l'objet d'observations hydropluviométriques classiques pendant six années (CHEVALLIER et al., 1985). Une campagne de simulation de pluie (CHEVALLIER, 1982) a été réalisée sur deux de ces bassins - Polaka (9,14 km²) et Jalafanka (0,80 km²) - dont les états de surface avaient été préalablement cartographiés (VALENTIN, 1981b). La carte des états de surface de l'ensemble du bassin de la mare d'Oursi (263 km²) a été dressée à partir de données satellitaires (image LANDSAT du 4 février 1976), en utilisant la carte du bassin de Polaka comme "vérité terrain" (LOINTIER et LORTIC, 1984).

Sur l'image choisie, quatre canaux radiométriques du MSS (Multi-Spectral Scanner) sont disponibles. Un "traitement d'images" (LORTIC, 1982) permet de créer deux nouveaux canaux qui rendent compte, pour le premier, principalement de l'état de la végétation, et pour le second, des états de surface, des reliefs et du réseau hydrographique. Une analyse multivariée sur ces deux canaux utilisant la procédure LOTERIE (ORSTOM, 1978 ; LOINTIER et PIEYNS, 1981) permet de déterminer un certain nombre de lots correspondants à des plages de même signification radiométrique. On attribue, par comparaison avec la vérité terrain, une signification thématique à chacun de ces lots. A titre d'exemple, on trouvera ci-après les dix thèmes déterminés sur le bassin de la Mare d'Oursi.

1. Sables vifs
2. Buttes (gabbros, roches vertes et cuirasses)

3. Altération de cuirasse
4. Blocs de roches diverses
5. Epannage gravillonnaire
6. Arène, sable grossier
7. Pellicule indurée
8. Sables fins, cordon dunaire
9. Végétation et bas-fonds
10. Nappes d'eau libre ou couvertes de végétation

Ces opérations de traitement d'image, sont effectuées directement sur l'écran de l'ordinateur spécialisé PERICOLOR 1.000.

La validité de la carte ainsi réalisée a été vérifiée en l'utilisant comme donnée d'entrée du modèle à discrétisation spatiale ORSTOM - Ecole des Mines (GIRARD et al., 1981). Pour chaque maille carrée du modèle, on détermine, sur le PERICOLOR, l'histogramme d'occupation de chacun des lots qui sont assimilés à des états de surface. La fonction de production du ruissellement de chaque carreau résulte d'une composition, à partir de l'histogramme, des fonctions de production de chaque état de surface (relations $L_r(P_u, I_k)$, déterminées sous pluies simulées). Le modèle a été testé en calculant la limnimétrie de la Mare d'Oursi en 1978, 1979 et 1980 (CHEVALLIER, 1986). On peut constater, sur la figure 33, la remarquable adéquation du modèle.

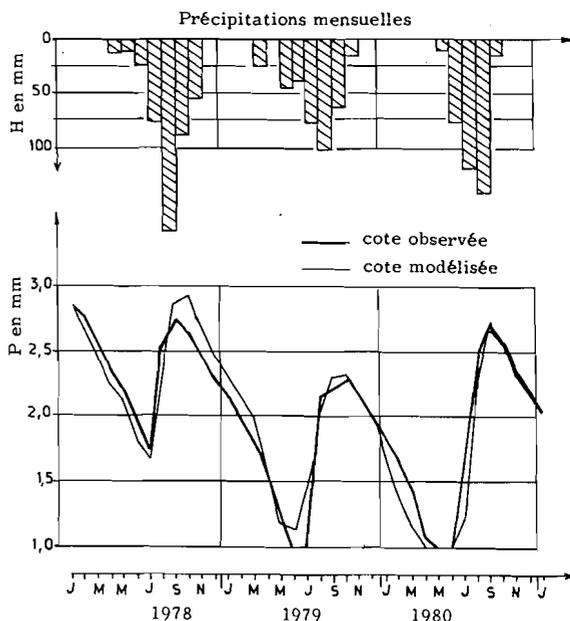


Figure 33
Niveaux de la mare d'Oursi (1978 - 1980).
(d'après CHEVALLIER 1986)

TRANSPPOSITION CARTOGRAPHIQUE : LES BASSINS DE GAGARA

Une transposition cartographique du même type a été réalisée sur les deux bassins de Gagara, situés à une cinquantaine de km à l'est de ceux d'Oursi (ALBERGEL, 1987). En utilisant les thèmes déterminés sur les bassins d'Oursi, on a établi la "carte satellite" des bassins de Gagara (photo n° 129). La comparaison de cette carte avec la vérité terrain (carte n° 9, VALENTIN, 1986d) montre que les limites des grandes unités cartographiques sont à peu près respectées. Mises à part les surfaces caillouteuses, les thèmes d'Oursi correspondent assez bien aux légendes de Gagara.

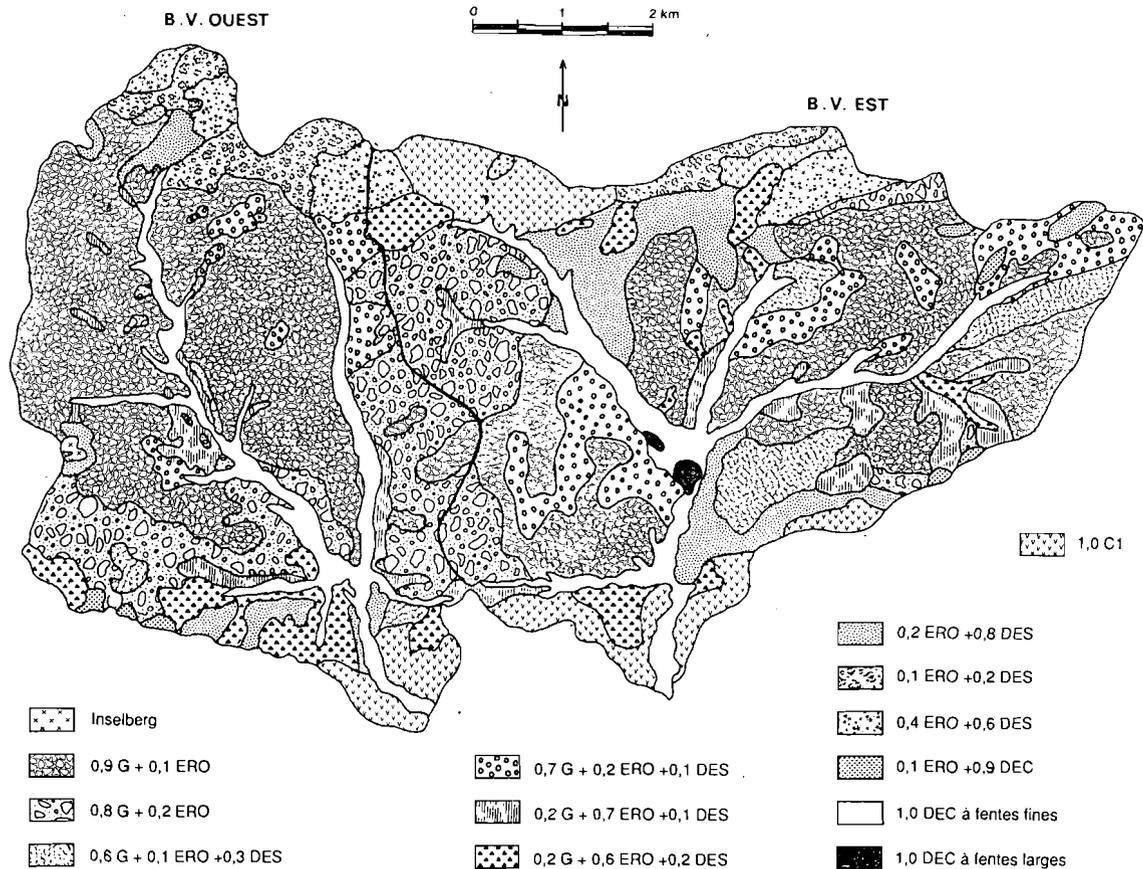
ALBERGEL (1987b) a également introduit la carte de Gagara ainsi réalisée à partir des thèmes d'Oursi ainsi que leurs fonctions de production du ruissellement dans un modèle à discrétisation spatiale, en utilisant les précipitations réellement mesurées à Gagara. Le tableau 9 permet de comparer les volumes annuels écoulés, observés en 1985, à ceux calculés par le modèle.

Tableau 9

Volumes écoulés annuels observés et calculés (1985)

Bassin	Volumes écoulés observés 10 ³ m ³	Volumes écoulés calculés 10 ³ m ³
Gagara Est	1535	1470
Gagara Ouest	1185	1176

La modélisation permet également une bonne reconstitution des crues individualisées. Le coefficient de corrélation de la droite de régression entre lames ruisselées calculées et observées est de 0,775 pour les 29 crues de l'échantillon et celui de la régression entre débits de pointe observés et calculés est de 0,858.



Carte n° 9

Carte des états de surface des bassins versants de Gagara, Burkina Faso. (d'après VALENTIN)



photo 129.
Analyse multispectrale de l'image satellitaire
(LANDSAT, 4 février 1976),
bassins versants de Gagara, Burkina Faso.



photo 130.
Brousse tigrée,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : l'alternance des bandes arbustives denses
et des bandes dénudées,
visible sur photographies aériennes,
est à l'origine du qualificatif "tigrée".



photo 131.
Brousse tigrée,
frontière nord du Burkina Faso.
A noter : au premier plan, dans la bande nue,
une surface de type G,
ensuite, dans la zone légèrement déprimée,
une surface de type DEC,
enfin, à l'arrière plan, dans la bande arbustive dense,
une surface de type DES.

LES LIMITES DE LA TÉLÉDÉTECTION

“On voit donc poindre pour l’avenir la possibilité d’utiliser, sur un bassin non observé, un modèle dont la fonction de production n’utiliserait que les données du mini-simulateur pour chaque type de couches superficielles du sol ; lesquelles seraient délimitées uniquement par photos satellitaires”. (RODIER, in CHEVALIER et al., 1985). Si tel est effectivement le but poursuivi, il faut, quand même, souligner que :

- Le Sahel se prête particulièrement bien à cette technique d’étude avec ses paysages typés, son nombre relativement réduit d’états de surface, aisément différenciables par analyse multispectrale d’images satellitaires. Les succès encourageants obtenus dans

cette zone ne sauraient cacher les difficultés à appliquer ce type d’approche à d’autres milieux comme la zone forestière où les fonctions de production du ruissellement sont conditionnées par les organisations internes de la couverture pédologique, ou la savane humide dont les états de surface sont sujets à des variations saisonnières importantes.

- La transposition entre Oursi et Gagara a été réalisée dans une zone géographique réduite, en utilisant une seule scène satellitaire. L’extension à partir d’images différentes serait, probablement, beaucoup plus complexe.
- A l’heure actuelle, il n’est pas possible de se passer d’une “vérité terrain” qui restera, sans doute, encore longtemps indispensable.

QUELQUES ÉTATS DE SURFACE CARACTÉRISTIQUES

INTRODUCTION

L’essentiel de cet ouvrage est consacré à la caractérisation et à l’étude du fonctionnement des surfaces élémentaires. Lors de la présentation de la méthode cartographique appliquée aux petits bassins versants, nous avons déjà évoqué la nécessité d’étudier l’organisation de la surface à l’échelle directement supérieure : l’état de surface (cf. définition, en Introduction, §3). Alors qu’il a été possible d’identifier un nombre restreint de surfaces élémentaires, celui des systèmes ou des juxtapositions de surfaces élémentaires paraît trop élevé pour prétendre en dresser l’inventaire. Toutefois, il existe des états de surfaces bien typés que nous nous proposons de présenter dans ce chapitre. Pour chacun d’entre eux, nous signalerons les surfaces élémentaires qui les composent, en utilisant la typologie présentée au chapitre 15.

En vue de répondre aux besoins cartographiques, nous nous appuierons sur les caractères facilement identifiables sur photographies aériennes : quelques formations végétales caractéristiques et les principaux ensembles du relief. Enfin, nous consacrerons un paragraphe particulier aux surfaces salines, souvent considérées comme caractéristiques de la zone sahélienne mais qui, au demeurant, ne couvrent qu’une aire très limitée.

QUELQUES FORMATIONS VÉGÉTALES PARTICULIÈRES

Formations naturelles

La brousse tigrée (photos n° 130 et n° 131)

Cette formation se caractérise sur les photographies aériennes par l’alternance de bandes claires et de bandes foncées, rappelant le pelage du tigre (CLOS-ARCEDUC, 1956). Au sol, cet état de surface est constitué du couple “surface nue encroûtée - fourré” dont la répétition dessine des lignes parallèles ou concentriques. Décrite dans la plupart des zones arides du globe : Moyen-Orient, Australie, Etats-Unis, Mexique, ..., la brousse tigrée de l’Afrique de l’Ouest se localise entre les 16^{ème} et le 12^{ème} degrés nord, et entre le 7^{ème} degré ouest et le 5^{ème} degré est, sous une pluviométrie annuelle comprise entre 250 et 700 mm, avec un maximum d’extension sous 500 mm (GALLAIS, 1967). Cette distribution a été précisée par de nombreux auteurs :

- **En Mauritanie**, AUDRY et ROSSETTI (1962) remarquent qu’elle se développe sur un modelé subhorizontal - pente de 0, 3% - lorsque l’ensablement des grès se réduit, voire disparaît. Les zones nues, toujours encroûtées, sont très souvent gravillonnaires

photo 132.
 Brousse tachetée,
 bassin versant de Banigorou, Niger.
 A noter : la termitière "cathédrale",
 partiellement érodée. Ces termitières
 apparaissant sous forme de taches claires
 sur fond sombre, sur les photographies aériennes,
 sont à l'origine du qualificatif "tachetée".

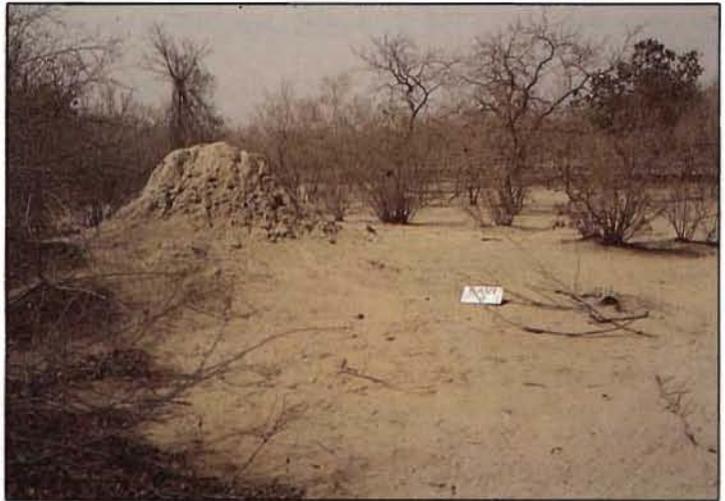


photo 133.
 Parc à *Acacia albida* Del., avril,
 bassin versant de Koumbaka, Mali.
 A noter : la couleur verte du feuillage,
 en fin de saison sèche. Egalement, à gauche,
 le parc à bovins, implanté sur un champ;
 les déjections animales participent à la fumure du sol.



photo 134.
 Altération du granite en boules,
 région de Méri, Cameroun.



(G). Les sols des zones de fourrés présentent, à l'inverse, une forte porosité (DES).

- **Au Sénégal**, BARRAL et al. (1983) signalent des formations analogues sur les plateaux et les versants gravillonnaires du Ferlo cuirassé.
- **Au Mali**, GALLAIS (1967) indique que les brousses tigrées s'étendent sur des unités géologiques variées : granites et roches vertes du Précambrien, grès à revêtements sableux de faible profondeur ou sur des cuirasses ferrugineuses plus ou moins consolidées. LEPRUN (1978), au terme d'études détaillées dans le Gourma, assure que ce type de formation se limite exclusivement aux sols développés sur les formations sédimentaires planes.
- **Au Burkina Faso**, COUREL (1977) suggère que les brousses tigrées du Liptako correspondraient à la présence de diaclases parcourant les dalles cuirassées des plateaux. Au nord du Yatenga, SERPANTIE, TEZENAS DU MONTCEL et VALENTIN (1988) les décrivent sur des pentes de 1 à 3 % sur les sols peu évolués, dépourvus d'induration, qui se forment dans les "fenêtres" ouvertes dans les plateaux cuirassés (BOULET, 1968).
- **Au Niger**, ces formations végétales occupent, dans la région méridionale, non seulement les plateaux cuirassés du Continental Terminal (AMBOUTA, 1984) mais aussi les glacis à argiles gonflantes calciques (GAVAUD, 1977). Plus au nord, lorsque les ensablements sur le plateau s'épaississent, la brousse tigrée tend à se dégrader (PONCET, 1986).
- **Au Tchad**, elle révèle des sols peu épais sur cuirasse ferrugineuse ou niveau gravillonnaire, de texture diverse : sablo-argileuse, argilo-sableuse (PIAS, 1970).

En dépit de la diversité des conditions géologiques et pédologiques que reflètent ces études, il semble, comme le souligne LEPRUN (1978) que les brousses tigrées se localisent le plus souvent sur des sols peu épais issus de roches sédimentaires, à l'exclusion des dunes anciennes et des sols hydromorphes des grandes vallées (GALLAIS, 1967). Par ailleurs, la diversité de leurs compositions floristiques traduirait celle des végétations climaciques dont elles constitueraient un faciès de substitution (BOUDET, 1972).

La plupart des auteurs s'accordent pour attribuer la formation des brousses tigrées aux effets conjugués des réorganisations superficielles et du ruissellement. La zone nue, toujours fortement encroûtée (types ERO ou G, parfois DEC à l'aval), offre un pédoclimat très sec. A l'inverse, la bande boisée située à l'aval bénéficie d'un pédoclimat bien plus humide : elle reçoit les eaux de ruissellement qui s'infiltrent aisément du fait d'une porosité ouverte en surface - absence de croûte ou surface de type DES. Dès lors, la face amont du fourré a tendance à

s'étendre tandis que la face aval dépérit. Ainsi, l'ensemble du système progresse vers l'amont ; selon les courbes de niveaux, il dessine des lignes parallèles ou en rosaces. Dans les zones les plus septentrionales, le rôle du vent devient prédominant dans l'orientation de la progression. En effet, sur la zone nue, les vents dominants de la saison sèche provoquent la déflation des sables. Ceux-ci s'accumulent en lisière des fourrés qui constituent autant d'obstacles. Se forment ainsi des cordons sableux qui, profitant de la suralimentation hydrique due au ruissellement de la bande encroûtée, offrent d'excellentes conditions édaphiques aux graines qu'ils piègent. Ces mécanismes entraînent le déplacement du système perpendiculairement à la direction des vents dominants. LEPRUN (1978) a mesuré une progression de 20 cm par an en moyenne, dans le Gourma malien.

La brousse tachetée

(photo n° 132)

Il s'agit d'une savane arbustive assez dense (surface souvent de type DES) où les nombreuses termitières plus ou moins effondrées ponctuent les photographies aériennes de taches blanches (surface de type ERO). Selon LEPRUN (1978), il s'agirait d'une forme particulière de brousse tigrée propre au substrat cristallin. Cette formation se développe, il est vrai, particulièrement sur le plateau mossi (au Yatenga, SARLIN, 1965, SERPANTIE, TEZENAS DU MONTCEL ET VALENTIN, 1988) et au Sénégal (dans le Ferlo cuirassé ; BARRAL et al. 1983).

"L'agora"

Il s'agit d'une steppe arborée dense des zones prédésertiques qui, sur les photographies aériennes délimitent nettement les nappes des cours d'eau (PONCET, 1986). Leurs surfaces peuvent être de type DES sur alluvions sableuses, ou de type DEC sur les matériaux plus argileux. *Acacia raddiana* et *Panicum turgidum* prédominent le long des petits cours d'eau, *Acacia nilotica* dès qu'ils sont plus importants (BARRY et al. 1983).

Le bois galerie ou la galerie forestière

Plus au sud, la végétation liée aux nappes d'inféoflux des cours d'eau tend à constituer de véritables bois ou forêts. Y prédominent généralement des surfaces de type DES et DEC, mais, du fait de l'activité faunique, souvent marquée dans ces milieux, il n'est pas rare d'y décrire des surfaces de types V ou TV.

La roselière et la bourgoutière

Les prairies marécageuses se repèrent aisément sur les photographies aériennes : elles se caractérisent par l'absence d'arbres - moins de 2% en couvert. Elles

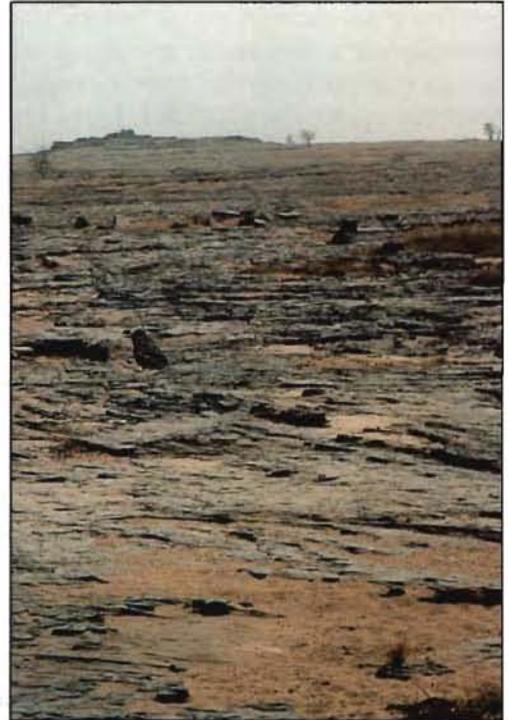


photo 135.
*Affleurement de grès en dalles,
bassin versant de Koumbaka, Mali.*



photo 136.
*Colline de roches vertes,
sols fersiallitiques, saison sèche,
bassin versant de Mouda, Cameroun.*



photo 137.
*Colline de roches vertes, saison des pluies,
bassin versant de Mouda, Cameroun.
A noter : le très fort couvert herbacé.*

prennent le nom de roselières (de "roseau") lorsqu'elles correspondent à des marais phréatiques de substrat sableux (GAVAUD, 1977). *Andropogon gayanus* s'y développe très souvent (BOUDET, 1984). Sur des alluvions plus lourdes : limono-sableuses à argileuses, ces prairies aquatiques prennent le nom de bourgoutières, du fait de l'abondance du bourgou : *Echinochloa stagnina* (BOUDET, 1984). De telles formations végétales ont été décrites depuis le Mali jusqu'au Tchad. Elles n'appartiennent pas aux surfaces testées : à l'évidence l'infiltration y est très réduite pendant la période d'inondation dont la durée peut varier de quelques semaines à plus de trois mois.

Anthropisées

Parcs à *Acacia albida*

(photo n° 133)

Il s'agit de champs sous un couvert arboré lâche, mais entretenu, voire planté, assuré principalement par l'*Acacia albida*. Cet arbre présente une grande valeur agroforestière : il produit chaque année une litière importante, de l'ordre de 4 t/ha qui participe au maintien du stock organique du sol et à la nutrition minérale des plantes cultivées (généralement du mil, ou de l'arachide). De plus, il perd son feuillage pendant la saison des pluies : ainsi, il n'intercepte pas la pluie et ne gêne pas de son ombre le développement des cultures. En saison sèche, il limite le dessèchement superficiel du sol. Sa racine pivot lui permet de puiser profondément l'eau, ce qui lui évite de concurrencer les cultures pour son alimentation hydrique (CHARREAU et TOURTE, 1967 ; MARCHAL, 1980). Fréquemment, les surfaces sont de type C1.

La rôneraie

Presque toutes les parties du palmier rônier - *Borassus aethiopum* - peuvent être utilisées : ses palmes, son bois qui résiste aux termites, le chou palmiste, la pulpe de ses fruits ainsi que ses graines, sans oublier le vin de palme. De ce fait, il est souvent épargné lors des défrichements et peut même être planté. Il indique la présence d'une nappe à faible profondeur. Les surfaces élémentaires sont le plus souvent de type C1.

Autres parcs

Les parcs arborés peuvent être constitués d'autres espèces préservées, à usage domestique : le karité (*Butyrospermum parkii*), le néré (*Parkia biglobosa*), le baobab (*Adansonia digitata*), le kapokier (*Bombax costatum*) et le tamarinier (*Tamarindus indica*). Sur photographies aériennes, la reconnaissance de ces peuplements facilite l'identification des parcelles cultivées, ou des jachères.

Les vergers

La plantation d'arbres fruitiers : manguier (*Mangifera indica*), goyavier (*Psidium goyava*), agrumes (*Citrus aurantifolia*, *Citrus limon*), s'accompagne souvent de cultures maraîchères dans des petits jardins (LAHUEC, 1980). Le plus souvent, les surfaces sont de type DEC, C1 ou DES.

LES SURFACES ASSOCIÉES AUX GRANDES FORMES DU RELIEF

Les formes hautes

Les granites

La majeure partie de la région d'étude est occupée par le socle granito-gneissique qui, hormis quelques cas particuliers n'est pas relié à un état de surface spécifique. Bien que très caractéristique sur le terrain (photos n° 16 et n°134), l'allération de granites en boules peut, en effet, selon le climat et le niveau de dégradation du milieu, être associée à une savane arborée dense (surface fréquemment de type DES) ou à des surfaces nues (ST2, ST3, ERO). Les affleurements sous forme d'inselbergs ou de dos de balcine appartiennent aux surfaces non testées.

Les grès

Ils induisent un paysage particulier de forme tabulaire qui se traduit par une homogénéité des caractéristiques physiographiques des bassins plus marquée que dans d'autres zones (bassins de Kountkouzout et de Koumbaka, photos n° 17, n° 18 et n° 135). Lorsque les dalles nues affleurent, aucune parcelle expérimentale n'a été implantée. En revanche, dès lors que les horizons superficiels, suffisamment épais, permettent le développement d'un couvert arbustif à combrétacées et un tapis graminéen, souvent clairsemé, à *Loudetia togoensis*, les surfaces élémentaires sont de type DES, G ou ERO.

Les schistes

En affleurement, ils influencent l'infiltration en fonction de l'orientation de leur schistosité (bassins non testés de Tikaré, Ansouri, Burkina Faso). Ailleurs, leur altération produit des sols limoneux, propices au développement de surfaces de type ERO.

Les roches basiques

(photos n° 136 et n° 137)

Elles sont généralement associées à un type de surface particulier : G, 5^{ème} variante, à couvert herbacé dense, sur des sols bien structurés, peu réorganisés. De telles surfaces ont été décrites sur les bassins de Kolel, sur



photo 138.
*Plateau cuirassé (bowal),
surface dominante de type G,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*

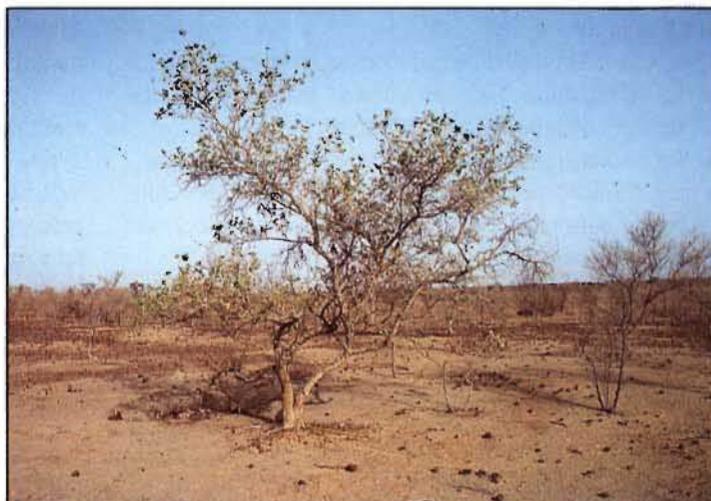


photo 139.
*Surface de type ERO
sur un sol cuirassé peu profond,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : la remontée des gravillons sous-jacents
par les racines du *Combretum micranthum* G.DON.*



photo 140.
*Talus de cuirasse démantelée, surface de type G,
bassin versant de Koumbaka, Mali.*

gabbro (Oursi, Burkina Faso ; CHEVALLIER et al., 1985), et de Mouda, (Nord-Cameroun, THEBE ; 1987).

Les milieux cuirassés

Normalement peu exploités, sauf comme pâturage, ces milieux comprennent le plus souvent une savane à *Pterocarpus lucens* et *Loudezia togoensis*. Les surfaces élémentaires sont constituées de surfaces de dessiccation (DES), et dans les mares de surfaces de décantation (DEC). On désigne alors par le terme de "bowal" (pluriel : bowé), les plateaux cuirassés endoréiques, couverts d'une végétation marécageuse saisonnière et ouverte (photo n° 138).

Lorsque sévit le surpâturage, comme par exemple dans le Ferlo cuirassé (Sénégal - VALENTIN, 1986b), ou au Yatenga (Burkina Faso - MARCHAL, 1980), le couvert herbacé disparaît et cède la place à des surfaces d'érosion (ERO - photo n° 139) ou grossière (G - photo n° 140).

Les piémonts

Quatre grands types d'états de surface peuvent exister :

- des colluvions très grossières associées à des surfaces de type G (reg), (photo n° 141),
- des arènes granitiques, très perméables, non testées,
- des surfaces peu réorganisées (DES) sur des sols bruns eutrophes dans les dépressions autour de certaines collines de roches vertes (photo n° 22),
- des jupes sableuses (BOULET, 1968), très souvent cultivées, et sujettes à l'érosion hydrique. Fréquemment, l'état de surface combine des micro-buttes sableuses (DES) et des surfaces nues pelliculaires (ERO), (photo n° 142). Les stades intermédiaires sont représentés par des surfaces de type ST2 et ST3, (CHEVALLIER et VALENTIN, 1984). D'origine éolienne, ces matériaux sableux se sont enrichis en colluvions plus fines. Leur texture plus lourde leur confère une cohésion plus forte que celle des dunes, ce qui allonge la durée des sarclages (MILLEVILLE, 1982 ; photos n° 143 et n°187). Non dégradées, les surfaces cultivées sont de type C1. Situées à l'aval d'impluviums souvent peu perméables, elles permettent de valoriser les eaux de ruissellement, à condition de les contrôler (SERPANTIE, TEZENAS DU MONTCEL et VALENTIN, 1988 ; photo n° 190). Dans le cas contraire, se développent des surfaces nues encroûtées (de type ERO) associées à des micro-buttes sableuses (DES, ST2 ou ST3) et à une érosion hydroéolienne très marquée (photo n° 127).

Les milieux sableux

Les dunes anciennes.

Les dunes anciennes se caractérisent par un relief peu marqué et des sols évolués (photo n° 26). En conditions

naturelles, les steppes arborées ou arbustives, à *Acacia raddiana*, *Aristida mutabilis* et *Cenchrus biflorus* - le "cram-cram" - se développent si les sols sont suffisamment riches en bases (GAVAUD, 1977), ou à *Commiphora africana*, *Euphorbia balsamifera* et *Calotropis procera* - la "pomme de Sodome", dans le cas contraire. Les surfaces, de type DES, ST2 ou ST3, peuvent, même en l'absence de surexploitation du milieu, présenter des taches encroûtées (type ERO), correspondant soit à d'anciennes termitières arasées, soit à l'action de l'érosion hydroéolienne (GAVAUD, 1968 et 1971b ; CHAMARD et COUREL, 1979).

Ces croûtes d'érosion peuvent se trouver consolidées par des algues, Cyanophycées psammophiles (*Scytonema sp.* - DULIEU, GASTON et DARLEY, 1977) qui réduisent d'autant plus l'infiltrabilité qu'associées à des champignons filamenteux, elles présentent une forte hydrophobie (RIETVELD, 1978). Malgré leur texture très grossière, ces dunes peuvent subir ainsi un ruissellement important comme l'ont montré SOMBROEK et ZONNEVELD (1971) au nord du Nigéria, et une érosion linéaire intense, particulièrement marquée dans le sud de la Mauritanie (DAVEAU, 1965) et dans la région centrale du Niger (ALBOT et WILLIAMS, 1979). Faciles à travailler, ces sols présentent généralement des conditions favorables de minéralisation, d'aération et d'infiltration. Une fois infiltrée, l'eau n'est que peu reprise par l'évaporation grâce à l'effet de "mulch" des horizons superficiels grossiers et souvent bouillants. Sous une pluviométrie suffisante, ces sols permettent la culture de mil (le plus souvent, surface de type C1), entrecoupée de longues jachères. Si l'équilibre cultures-jachères est rompu, l'horizon superficiel subit l'érosion hydroéolienne et l'horizon B, très pauvre et peu perméable, affleure - surface de type ERO - (MAINGUET, CANON-COSSUS et CHEMIN, 1979 ; BRABANT et GAVAUD, 1985).

Les dunes récentes

Les dunes plus récentes se distinguent des précédentes par des reliefs plus marqués, des sols peu évolués et une végétation plus lâche (à *Acacia senegal*, dans le Ferlo sableux - LEPRUN, 1971). Leur surface la plus fréquente est de type DES, localement ERO, à la faveur d'anciennes termitières. Très sensibles à l'érosion éolienne, ces dunes, en général, ne sont pas cultivées.

Les dunes vives

(photos n° 145 et n° 146).

Il arrive que les dunes précédentes soient ravivées sous l'effet du surpâturage, du piétinement ou de la



photo 141.
 Surface de type G
 en piémont de colline de magnétite,
 région d'Oursi, Burkina Faso.
 A noter : à l'arrière plan, la jupe sableuse
 cultivée en mil.



photo 142.
 Jupe sableuse,
 région d'Oursi, Burkina Faso.
 A noter : l'alternance des surfaces dénudées
 de type ERO et les microbuttes sableuses
 enherbées (type DES);
 à l'arrière plan, une colline de gabbro altéré.



photo 143.
 Jupe sableuse cultivée en mil (culture en poquets), décembre,
 région d'Oursi, Burkina Faso.
 A noter : la surface de type C1.

mise en culture (CHAMARD et COUREL, 1979). Tel est le cas notamment des dunes riveraines des grands fleuves, ou même de cours d'eau plus modestes où des microdunes, bien distinctes des bourrelets de berge, peuvent se développer. *Leptadenia Pyrotechnica* s'avère alors un bon marqueur de la remobilisation des sables (HAGEDORN et al. 1977). Les surfaces constituées de dépôts éoliens (croûte de type EOL), sont assimilées à des surfaces élémentaires de type DES.

Les dépressions interdunaires

Entre les formations dunaires, les sols enrichis en argile et limon offrent une infiltrabilité bien plus faible (surfaces de type ERO ou DEC). Dans le Ferlo sableux, se forment des mares temporaires, dépourvues de végétation, les "vendous" (COUREL, 1985), bordées de *Mitragyna inermis* et d'*Acacia seyal*. Ce dernier décèle des sols assez alcalins (BRABANT et GAVAUD, 1985).

Les glacis

A peu près tous les types de surface peuvent y être décrits, notamment les regs (G), les surfaces verticales (photo n° 147), les surfaces cultivées (C1, C2 et C3), ... (JOLY, DEWOLF et RIOU, 1980). A l'aval, les surfaces très encroûtées (type ERO) peuvent prédomi-

ner. Tel est le cas d'un état de surface dénommé "hardé" en fougouldé, au Nord-Cameroun, ou "naga" en arabe, au Tchad (PIAS, 1970). Même sous un climat relativement humide, la végétation, caractérisée par *Lanea humilis*, reste très clairsemée du fait de la très faible infiltrabilité et de l'abondance du sodium dans le complexe absorbant. La culture de riz pluvial, menée sur des parcelles labourées dotées de diguettes, augmente l'infiltration et assure une baisse sensible du sodium échangeable et soluble initialement présent dans le profil cultural (BRABANT et GAVAUD, 1985). Toutefois, une surface "hardé" ne correspond pas exclusivement aux sols halomorphes. Elle a été décrite sur des sols fort variés depuis les sols peu évolués colluviaux, aux sols ferrugineux tropicaux, jusqu'aux vertisols dégradés (BRABANT et GAVAUD, 1985 ; THEBE, 1987).

Les formes basses

Les chanfreins

Il s'agit de la zone de raccordement entre les versants et les bas-fonds. Très sensibles aux érosions hydrique et éolienne (exemple de Bidi, fig. 34), ils présentent fréquemment des surfaces de type ERO (d'horizon B), (photos n° 148, n° 149 et n° 150), (BOULET, 1968 ;

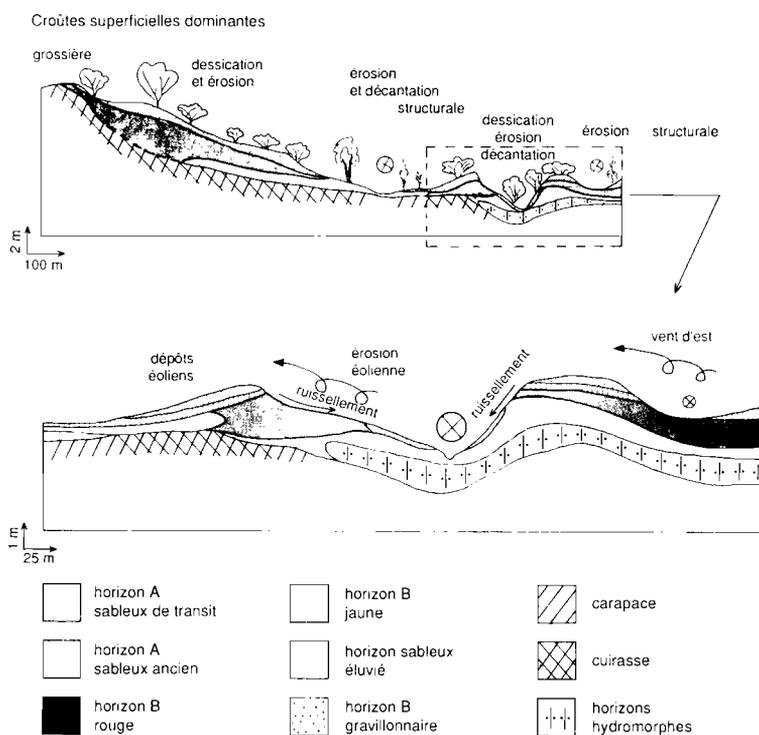


Figure 34

Distribution des horizons pédologiques et des surfaces élémentaires le long d'une toposéquence à Bidi (Yatenga, Burkina Faso). A noter : la dissymétrie des versants de part et d'autre du bas-fond.

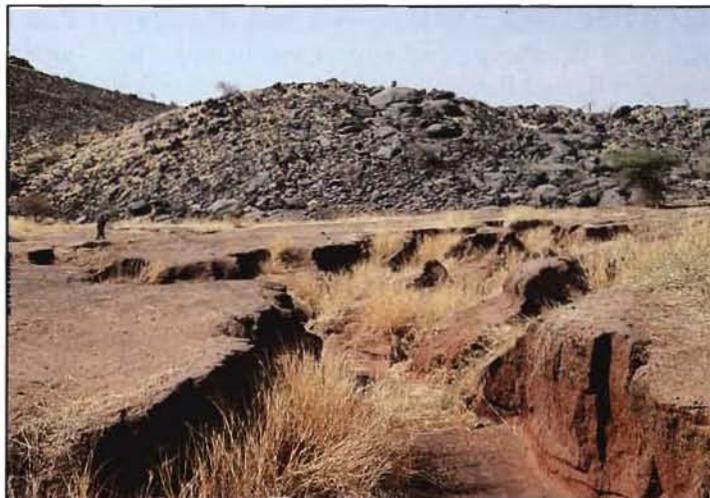


photo 144.
*Ravine dans le sol ferrallitique d'une jupe sableuse,
 région d'Oursi, Burkina Faso.*
*A noter : les surfaces de type ERO,
 à gauche de la ravine.*



photo 145.
*Dunes vives,
 rive nord de la mare d'Oursi, Burkina Faso.*
*A noter : la végétation ne colonise
 que les points bas.*



photo 146.
Dune vive, Gourma, Mali.
*A noter : au premier plan,
 les microrides d'éolisation,
 et la dissymétrie des versants,
 le plus abrupt étant sous le vent.*

MARCHAL, 1983). L'érosion, après avoir décapé les horizons superficiels, entraîne l'affleurement de l'horizon B. Seul *Balanites aegyptiaca* tolère alors des conditions pédoclimatiques aussi sèches. La plantation de *Piliostigma reticulatum*, qui favorise la formation de micro-buttes sableuses permet l'éventuelle reconstitution, au moins localement, d'un horizon superficiel (SERPANTIE, comm. or., 1987), plus favorable à l'infiltration et au développement des semences (surface de type DES).

Les bas-fonds et les plaines alluviales

On désigne par bas-fonds "les fonds de vallons et des petites vallées. Ils constituent les grands axes de drainage des eaux. Les eaux de ruissellement s'y écoulent, les nappes phréatiques s'y concentrent. Les bas-fonds subissent l'influence directe des versants et des sommets essentiellement par le biais des transports liquides et solides" (BERTON, 1988). Alors que naguère, ils étaient le lieu privilégié des céréales de sécurité : sorgho, maïs, riz, s'y étendent de plus en plus les jardins maraîchers et les vergers. A l'inverse des milieux sableux, ils présentent généralement une minéralisation et une infiltrabilité lentes. Outre certaines surfaces liées à des systèmes de culture particuliers (culture en planches pour le maraîchage, irrigation, ..., photo n° 196), les bas-fonds et les plaines alluviales sont fréquemment couverts de surfaces de décantation (DEC), parfois bordées, dans les régions les plus humides, de surface de type DES, V ou TV. (photos n° 151 à 155), (GALLAIS, 1967). Toutefois, de nombreux autres cas peuvent se présenter, depuis des surfaces DES, ST2, voire ST3 sur des alluvions sableuses, jusqu'aux surfaces d'érosion (ERO) sur alluvions argileuses (VALENTIN, 1981).

LES SURFACES SALINES

Associées aux sols salés et sodiques, les efflorescences salines ne couvrent, à l'échelle du Sahel, que des surfaces limitées (photos n° 101 et n° 102). Elles ont été décrites :

- **Au Sénégal** : en saison sèche, le débit du fleuve Sénégal n'est pas suffisant pour s'opposer à la remontée des eaux marines dans le delta et sur plusieurs centaines de kilomètres en amont, provoquant ainsi la salinisation des terres alluviales. Dans les cuvettes salées, les croûtes subissent chaque année une évolution cyclique où se succèdent efflorescences et aspect poudreux (MOUGENOT, 1983).
- **En Mauritanie**, AUDRY et ROSSETTI (1962) ont signalé qu'au fond de certaines cuvettes du sud-est du pays, des efflorescences blanches se forment par plages sur des plaquettes polygonales argileuses (DEC).
- **Au Mali**, les surfaces situées à la périphérie des lacs (Horo, Faguibine) présentent des efflorescences salines (AUBERT, 1948). Quoique les sols irrigués des régions de Niono et de Sokola n'en soient pas exempts, ils conviennent assez bien, semble-t-il, à la culture du cotonnier (DABIN, 1948). Dans le Gourma, c'est-à-dire à l'intérieur de la boucle du Niger, les sols recherchés par le bétail pour leur teneur élevée en sels (cures salées) se sont développés sur des formations dolomitiques. Bien que les niveaux les plus riches se trouvent généralement à une profondeur de plusieurs décimètres ou mètres, certaines efflorescences blanches apparaissent localement en surface (LEPRUN, 1978). A l'est de Gao, dans la région de Ménaka, KLEIN (comm. orale, 1989) a observé également des efflorescences salines à la surface des dépressions argileuses.
- **Au Burkina Faso** : les sols halomorphes du nord du pays dont la composition chimique dérive de celle de la roche mère (granites calco-alcalins) ne présentent pas d'efflorescences salines, mais des croûtes (BOULET, 1968), que l'on peut assimiler à des croûtes d'érosion (ERO).
- **Au Niger** : les travaux de cartographie pédologique menés au sud du pays (GAVAUD, 1975) ont montré que les surfaces à efflorescences salines n'apparaissent qu'à l'est de Zinder, principalement sur les dépôts fluvio-lacustres de la cuvette tchadienne et dans quelques vallées mortes. Plus au nord, dans le Tamesna oriental, BOULET (1966) ne signale pas de surfaces analogues.
- **Au Tchad** : les sols à efflorescences salines se localisent principalement à la périphérie de lacs ou de dépressions : lac Tchad bordé à l'est et au nord de cuvettes ("ouadi") souvent natronées, de part et d'autre de la dépression du Bahr el Ghazal, au pourtour du lac Fitri (PIAS, 1970).
- **Au Cameroun** : BRABANT et GAVAUD (1985) signalent l'existence de sols à efflorescences salines de bicarbonates et de sulfates de sodium, potassium et magnésium dans la plaine qui borde la partie camerounaise du lac Tchad. Ces sols présentent alors un niveau argileux à faible profondeur.

photo 147.
Glacis, sol subaride à caractère vertique,
bassin versant de Jalafanka, Burkina Faso.
A noter : l'absence d'arbre
et la faible densité d'arbustes,
liées à la nature vertique du sol.



photo 148.
Surface d'érosion (ERO),
en position de chanfrein,
bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.



photo 149.
Surface d'érosion (ERO),
en position de chanfrein,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : les zones plus foncées correspondent
à des croûtes de ruissellement (RUI).



LA DYNAMIQUE ÉVOLUTIVE DES ÉTATS DE SURFACE

INTRODUCTION

La plupart des surfaces élémentaires dérivent génétiquement les unes des autres. Connaissant ces filiations, on peut prévoir les évolutions possibles en fonction :

- de l'état de surface actuel et du sol sous-jacent,
- des conditions climatiques envisagées,
- des types de mise en valeur du milieu.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les dynamiques évolutives telles qu'elles se manifestent, d'une part, dans les milieux "naturels", d'autre part, dans ceux qui subissent une pression importante de la part des éleveurs et des cultivateurs. Nous nous efforcerons de différencier les dynamiques saisonnières des évolutions à plus long terme. Ces modifications des états de surface ont des répercussions sensibles sur l'écoulement des petits bassins versants que nous présenterons sous forme de deux exemples. Enfin, nous évoquerons les différentes parades envisagées contre la dégradation des états de surface.

LES MODIFICATIONS DES ÉTATS DE SURFACE

Dynamique évolutive des états de surface naturels

Compte-tenu de la complexité des processus en jeu, et de la variété des situations, il est très difficile, parmi les causes de dégradation du milieu, de faire la part entre les causes naturelles (sécheresse) et les causes anthropiques (augmentation de la population, de la charge pastorale, des surfaces cultivées, ... - BERNUS, 1984). Force est d'admettre qu'il existe des dynamiques d'état de surface, indépendantes de toute action humaine.

Variations saisonnières

Au premier rang de ces évolutions, se rangent celles qui suivent les rythmes saisonniers. Ainsi certaines surfaces qui semblent très dégradées en fin de saison sèche peuvent se couvrir d'un tapis graminéen continu au cours de l'hivernage (photos n° 156 et n° 157).

Evolution à plus long terme

Il existe bien sûr des évolutions à plus long terme selon les variations pluviométriques. Les dunes fixées du Ferlo au nord du Sénégal en fournissent un exemple. Sous l'effet de la sécheresse qui a débuté en 1969, les taches dénudées et encroûtées se sont multipliées. Elles

apparaissent même dans les zones protégées de l'action du bétail, là où les réserves hydriques sont les plus limitées (VALENTIN, 1985a). Le retour à une pluviométrie plus "normale" en 1981, a provoqué l'érosion partielle de micro-buttes sableuses (DES) en sorte que les sédiments sableux recouvrent les taches nues encroûtées (ERO), (photos n° 158 et n° 159). Se forment ainsi des surfaces de type RUI ou ST2, propices au piégeage des graines et à la recolonisation des zones nues. Ces observations suggèrent l'existence d'un cycle évolutif des états de surface (fig. 35) :

- En période "humide", l'ensemble de la surface est couvert par la strate herbacée (surface de type DES),
- En période sèche, l'état de surface est constitué d'un système comprenant :
- Des taches plus ou moins étendues dépourvues de végétation et encroûtées (surface ERO). Elles résultent de la disparition du couvert herbacé et de la

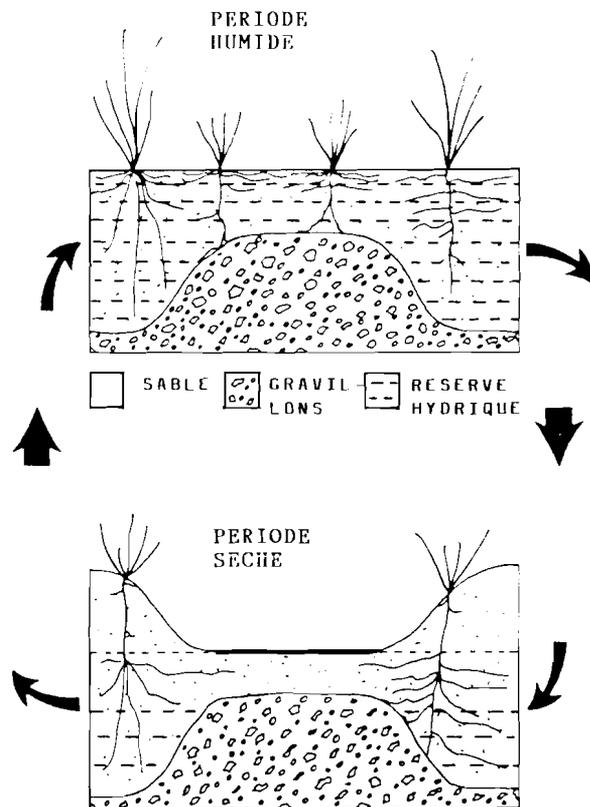


Figure 35
Evolution cyclique des états de surface dans le Ferlo, Sénégal (d'après VALENTIN, 1981)

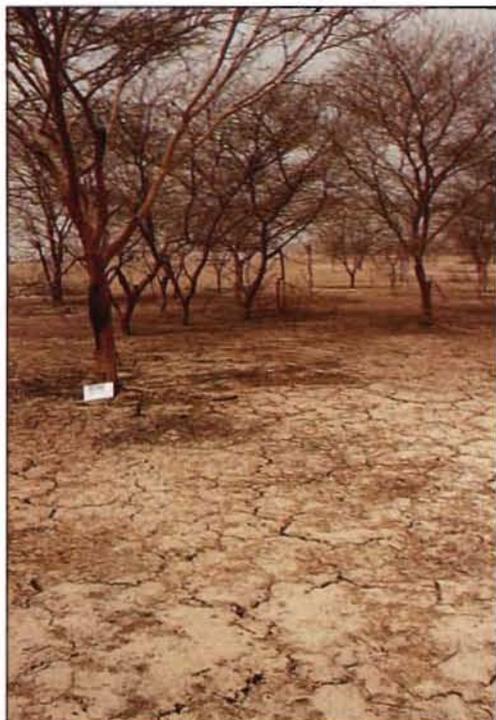


photo 151.
 Bas-fond argileux, surface de type DEC,
 bassin versant de Banigorou, Niger.
 A noter : les fentes de retrait, et ,
 au second plan les *Acacia seyal* Del.



photo 150.
 Tête de ravine incisant une surface d'érosion (ERO)
 en position de chanfrein, région de Ségou, Mali.



photo 152.
 Fond de mare, surface de type DEC, saison sèche,
 bassin versant de Tin Adjar, Mali.
 A noter : la reprise par l'érosion linéaire
 des sédiments limoneux, très probablement sodiques.

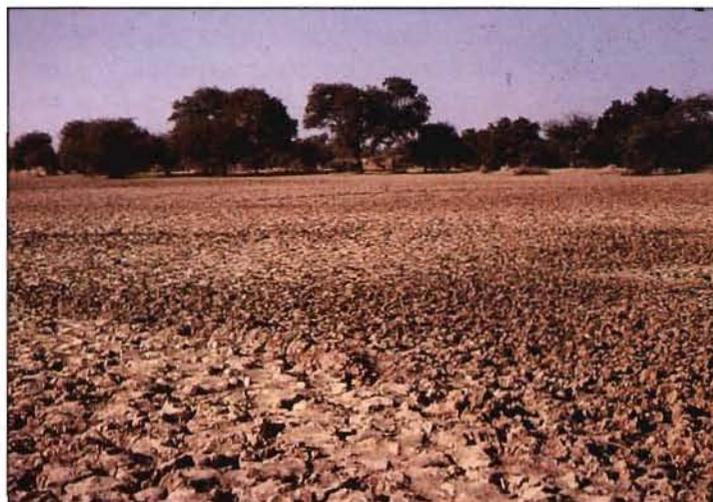


photo 153.
 Fond de mare, surface de type DEC, saison sèche,
 région de Markoye, Burkina Faso.
 A noter : la forte rugosité de la surface argileuse
 consécutive au piétinement par le bétail.

transformation de la croûte de dessiccation (DES) en croûte structurale (ST2 ou ST3) sous l'effet de l'impact direct des gouttes de pluies. Les microhorizons sableux subissent, en saison sèche, l'action érosive du vent; seule affleure alors la pellicule plasmique (croûte d'érosion ERO).

- Des micro-buttes sableuses enherbées, édifiées avec le sable érodé des zones nues, piégé par la végétation subsistante (DES).

Le couvert herbacé sahélien se caractérise par son adaptabilité aux périodes de déficit hydrique (certaines plantes adoptent des formes naines, BILLE ; 1974), et son aptitude à la régénération en conditions plus favorables (BOUDET, 1984b). Plusieurs indices nous incitent, néanmoins, à la prudence quant au pronostic de reconstitution des états de surface naturels :

- Du fait de la sécheresse, les micro-buttes sableuses enherbées ont tendance à se dénuder et à subir elles-mêmes les processus menant à leur remplacement par des surfaces de type ERO (photo n° 160). C'est ainsi que des régions entières, comme le Ferlo sableux, naguère couvertes de pâturages et de surfaces de type DES, ne présentent plus qu'une croûte uniforme d'érosion (ERO), (GAUVAUD, 1986, comm. orale).
- Même en milieu protégé de l'action du bétail, le couvert arboré subit une dégradation très marquée du fait de la sécheresse. Pour les arbres, les possibilités de régénération sont bien plus limitées que celles des plantes herbacées. En sorte que même un retour prolongé à une pluviométrie normale ne s'accompagnerait pas d'une reconstitution rapide de la strate ligneuse (POUPON, 1980).

Evolution des surfaces pâturées

Parmi les causes de dégradation du milieu, le surpâturage et l'effet du piétinement du bétail sont souvent citées (WARREN et MAIZELS, 1977 ; HOUEROU, 1979 ; GILLET, 1980 ; WISPELAERE, 1980), (photos n° 161 et n° 162). Les problèmes seraient particulièrement aigus autour des mares et des forages (photos n° 163 et n° 164). La plupart des spécialistes s'accordent pour distinguer des évolutions différentes selon les régions sableuses et les régions à sols peu profonds sur cuirasse.

Parcours des régions sableuses

Afin d'étudier l'impact de la charge pastorale sur l'évolution des états de surface, de nombreux relevés ont été effectués le long d'axes radiaux centrés sur des forages du Ferlo (au nord du Sénégal), implantés sur des dunes fixées. Les résultats montrent que le piétinement détruit les micro-buttes sableuses et favorise le recouvrement des surfaces nues encroûtées (ERO) par

des horizons sableux (photos n° 165). En se rapprochant du forage, et donc en fonction d'une charge croissante, on passe (figure 36, voir page 174) du système naturel micro-buttes (DES) - surfaces ERO, décrit précédemment, à un système de micro-buttes affaissées (DES) entourées de surfaces assimilées à ST2 (du fait de la présence de la pellicule plasmique à moins de 7 cm de profondeur), enfin à une surface très piétinée, enrichie en fumure organique, assimilée à une surface de type DES. Il est clair qu'en terme d'infiltrabilité, une telle évolution correspond à une amélioration. Dans une couronne comprise entre 0,5 km et 2 km autour des forages, la déflation des particules fines se trouve néanmoins favorisée par le piétinement intense et par les faibles apports organiques (photo n° 166).

Dans des conditions de charges pastorales plus élevées ou de concurrence plus vive avec l'agriculture, d'autres régions dunaires subissent des dégradations plus alarmantes. Ainsi dans le Gourma (intérieur de la boucle du fleuve Niger au Mali), et dans l'Oudalan (au nord du Burkina Faso), BOUGERE (1979) et BARTH (1982) imputent l'érosion linéaire à l'effet du surpâturage. Dans cette dernière région, CHAMARD et COUREL (1979) considèrent que le bétail est en partie responsable de la remobilisation des sables et de la formation de dunes vives.

Parcours des régions cuirassées

Les faibles réserves hydriques des sols peu profonds sur cuirasse rendent leur couvert végétal particulièrement sensible à la sécheresse. Ce dépérissement de la végétation se trouve accéléré par le surpâturage et la coupe de bois de chauffe. La dégradation du milieu, d'autant plus marquée que l'on se rapproche d'un forage implanté dans un tel milieu (photo n° 167 à n° 172) a été schématisée sur la fig. 37(voir page 176). Comme pour les milieux sableux, la surface passe par les différents états suivants :

- dessiccation (DES), elle peut couvrir au départ la quasi-totalité de la surface,
- structurale 2 (ST2), dans les zones les moins bien protégées par la végétation,
- structurale 3 (ST3),
- érosion (ERO), le décapage par le vent et le ruissellement des microhorizons sableux des surfaces structurales provoque l'affleurement de la pellicule plasmique que consolident des microorganismes (algues) ; les sables érodés par le vent sont capturés par la végétation subsistante,
- éolisation (EOL), la végétation n'est plus suffisamment dense pour s'opposer à l'action érosive du vent. Comme l'horizon B sous-jacent est souvent gravillonnaire, la surface d'érosion devient grossière (G). Le ruis-



photo 154
*Vallée alluviale, reprise par les érosions en nappe et linéaire, région de Maroua, Cameroun.
A noter : les micromarchés d'escalier à la limite entre les surfaces de type ERO et RUI.*

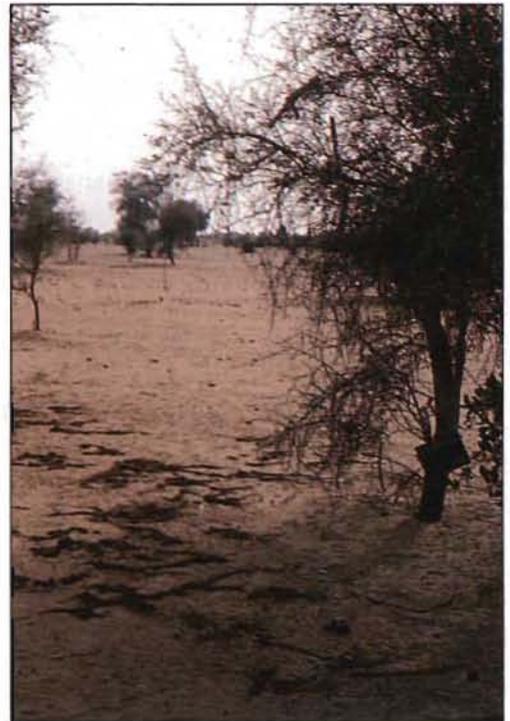


photo 156.
*Surface sableuse piétinée par le bétail, type DES, en fin de saison sèche, Tatki, Ferlo, Sénégal.
A noter : les placages de termites sur les branches au sol du *Balanites aegyptiaca* (L.) Del.*



photo 155.
*Surface de type DEC, delta intérieur du fleuve Niger, Mali.
A noter : l'absence d'arbre due aux longues inondations périodiques*

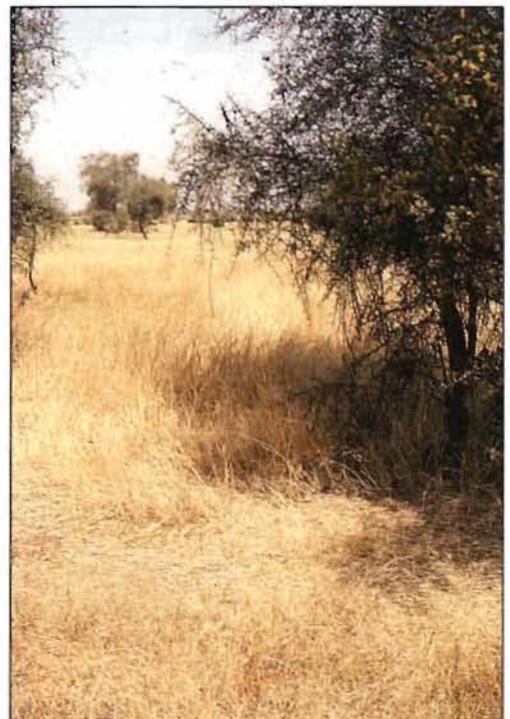


photo 157.
*La même surface, après la saison des pluies.
A noter : le couvert quasi-continu des herbacées.*

sellement qu'elle produit peu à peu devient linéaire et incise le sol jusqu'à la cuirasse.

Ces modifications importantes des états de surface se manifestent dès lors que la charge pastorale excède les ressources du milieu (photos n° 173 et n° 174).

Evolution sous l'effet des cultures

Variations au cours du cycle cultural

La distinction entre les terres cultivées et celles maintenues sous couvert naturel n'est pas toujours très pertinente : qu'y-a-t-il en effet de commun entre une parcelle récemment défrichée et cultivée manuellement et un bloc de culture mécanisée avant le semis? L'agriculture entraîne des perturbations très diversifiées qu'il est nécessaire d'identifier. Certaines caractéristiques du profil cultural (semelle de labour, apparition à faible profondeur d'un horizon peu drainant...) peuvent certes

influencer sur l'aptitude au ruissellement, mais nous avons vu qu'en zone semi-aride, les caractères d'état de surface (microrelief, couvert végétal, organisations pelliculaires superficielles) s'avèrent les critères les plus pertinents pour expliquer l'infiltration, sur les sols cultivés comme sur les sols "naturels". L'analyse des transformations de surfaces, soumises à une culture manuelle (cf. chapitre 10), amène à distinguer les sols contenant une certaine part d'éléments fins et les sols à dominante sableuse.

Sur les sols contenant moins de 60% de sable, la dynamique évolutive de la surface est généralement la suivante :

- surface à structure fragmentaire (mottes),
- surface à structure fragmentaire altérée : croûte structurale 1 (ST1),
- croûte d'érosion (ERO),
- croûte de ruissellement (RUI).

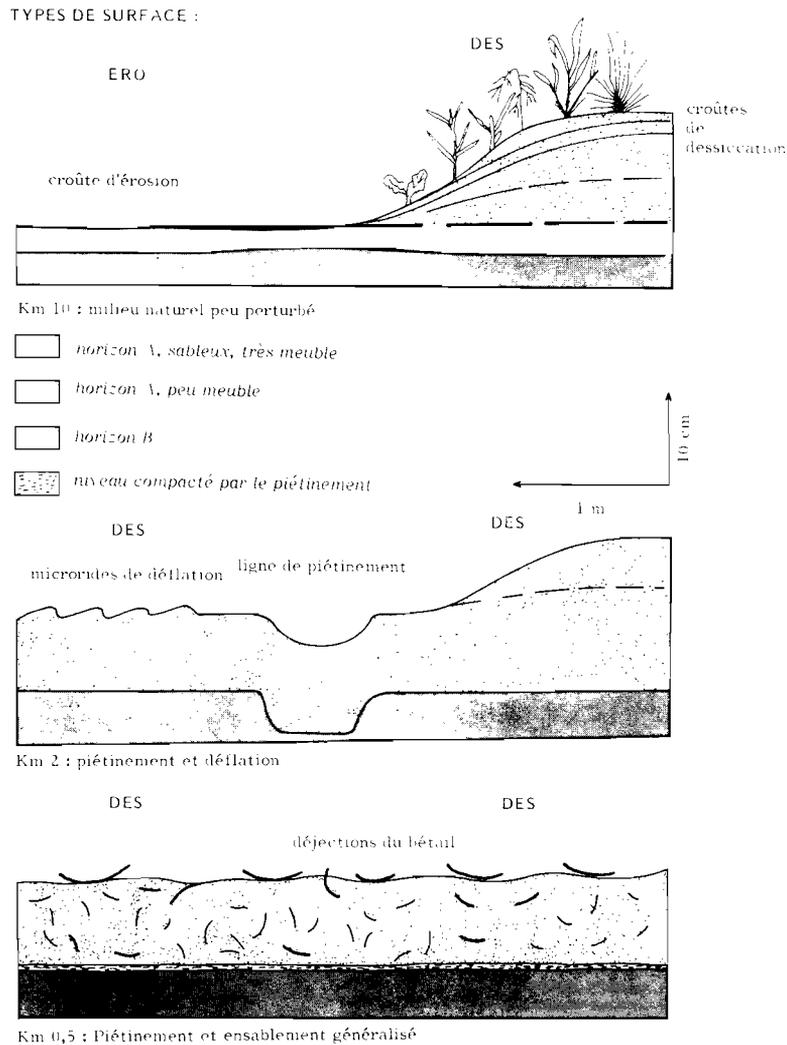


Figure 36
Evolution de la surface du sol en fonction de la distance à un forage dans la région sableuse du Ferlo, Nord-Sénégal.
(d'après VALENTIN, 1981_c)

photo 158.

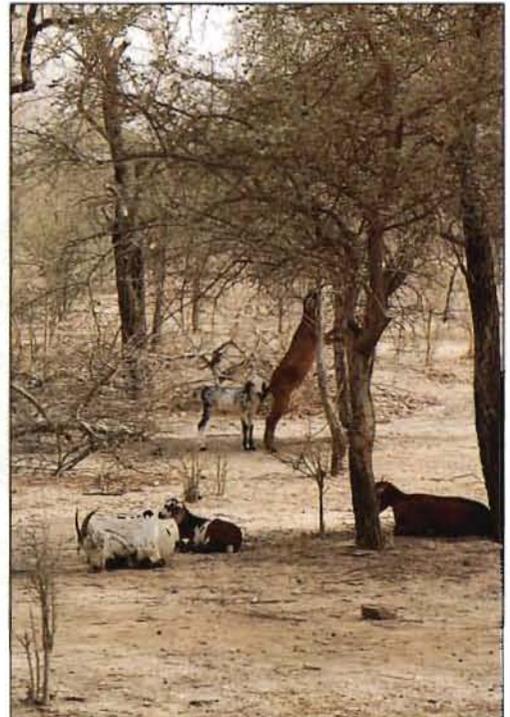
Limite de surface ERO (premier plan)
et de surface DES,
au pied du *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir,
Tatki, Ferlo, Sénégal.
A noter : la ligne de clous implantés à la limite
des deux surfaces et perpendiculairement
dans la microbutte sableuse.

**photo 159.**

Mêmes surfaces, après la saison des pluies.
A noter : l'enherbement de la microbutte sableuse
(DES) et la recolonisation partielle par les herbacées
de la surface ERO, là où elle est recouverte par les
produits sableux de l'érosion de la microbutte.

**photo 160.**

Transformation partielle, du fait de la sécheresse, d'une microbutte
sableuse enherbée (DES) en surface d'érosion (ERO),
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : la surface de type G alentour.

**photo 161.**

Broutement des arbustes par les petits ruminants,
bassin versant de Banigorou, Niger.

Il n'est pas rare de suivre ainsi au cours du cycle cultural une transformation complète depuis une surface de type C1 jusqu'à une surface de type C3. Si le microrelief s'émousse au point de disparaître, la surface d'érosion devient prépondérante (photo n° 177). Pour peu qu'elle reste nue et que le sol sous-jacent soit gravillonnaire, elle peut céder la place à une surface grossière encroûtée (G) (photos n° 175 et n° 176).

Sur les sols plus sableux, les petits agrégats se délitent très rapidement sous l'effet des pluies donnant naissance à des croûtes de dessiccation (DES) ou structurale (ST2 ou ST3). Le plus souvent, les surfaces se maintiennent au stade C1 et C2. Elles atteignent plus rarement le stade C3, caractérisé par l'extension des croûtes d'érosion.

Variations à plus long terme

La pression démographique, conjuguée à la sécheresse, a entraîné le défrichement de terres réservées au parcours. Tel est le cas par exemple de certaines brousses tachetées dans le nord du Yatenga où la mise en culture a provoqué des dégradations sensibles (SERPANTIE et VALENTIN, 1985, photo n° 175). Bien que plus rapides, ces modifications des états de surface sont analogues à celles décrites précédemment pour les parcours en milieu cuirassé. Moins spectaculaires, mais non sans conséquence sur le ruissellement, les évolutions dans les régions légèrement plus humides vont être maintenant illustrées par deux exemples.

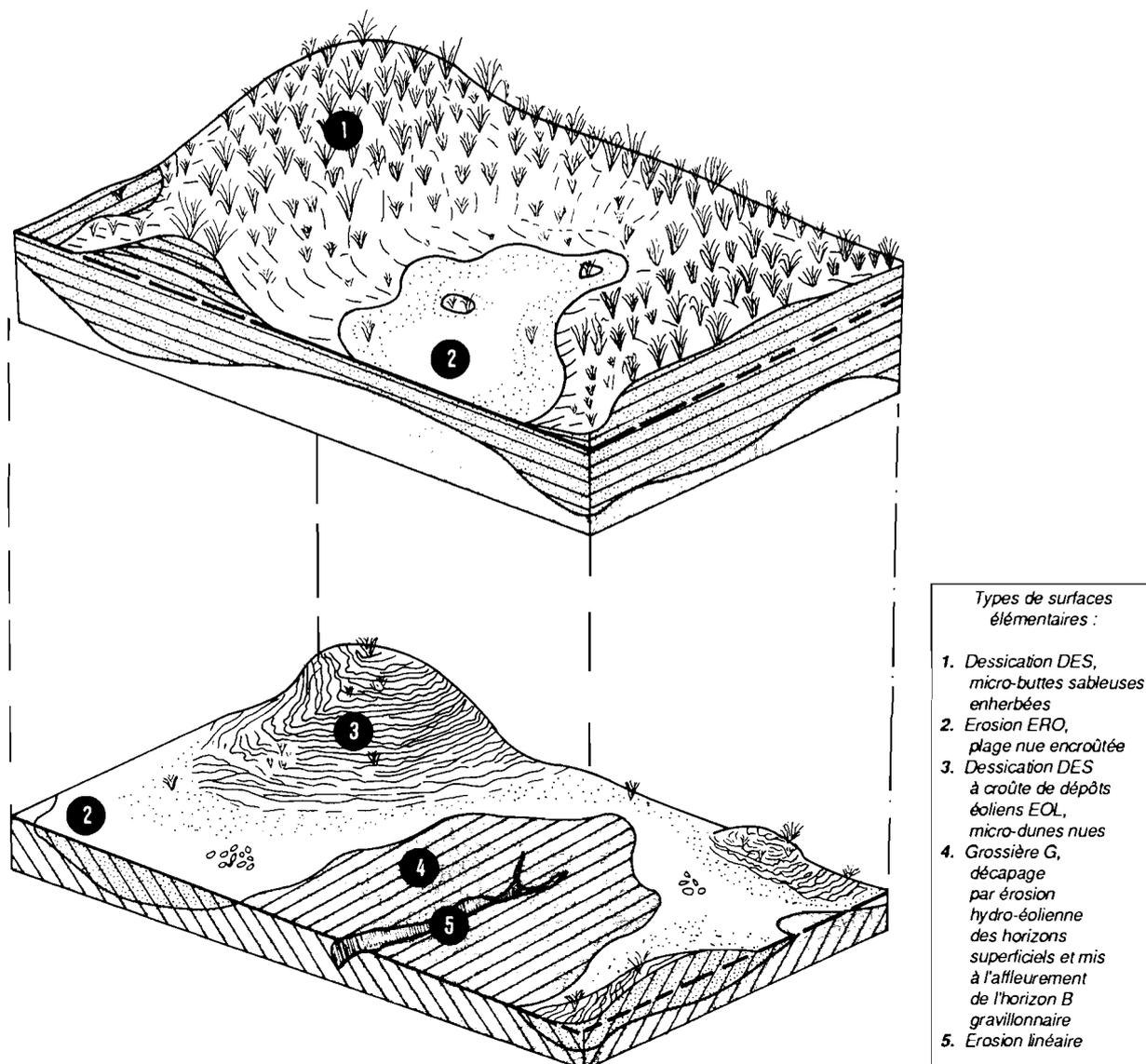


Figure 37

Evolution d'une surface sahélienne sous l'effet de la sécheresse et du surpâturage.

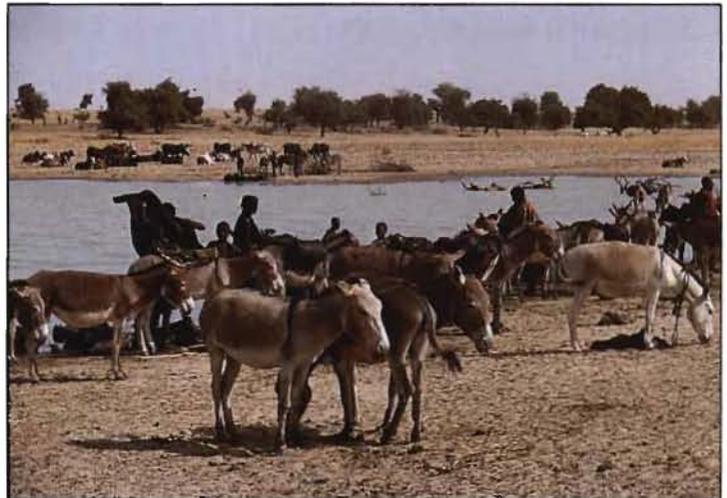
photo 162.
*Conséquence de la sécheresse et du surpâturage,
surface de type G,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.*



photo 163.
*Concentration de bovins autour d'un forage,
Tatki, Sénégal.*



photo 164.
*Concentration d'ânes autour d'une mare,
région d'Oursi, Burkina Faso.
A noter : les traces de piétinement
sur la surface argileuse de type DEC.*



INFLUENCE DE LA MISE EN CULTURE SUR LE RUISSELLEMENT ET L'INFILTRATION

Modification des états de surface :

Exemple de deux bassins cultivés du plateau mossi

Comme nous venons déjà de l'évoquer, la période de sécheresse qu'a connue le sud du Sahel de 1969 à 1984, ainsi que l'augmentation de la pression démographique sont à l'origine de profondes modifications des états de surface qui résultent de :

- La diminution du couvert herbacé, accompagnée d'un changement de la composition floristique, les graminées pérennes disparaissant au profit des annuelles. De même, les rares recrûs ligneux sont des épineux qui remplacent les combrétacées.
- L'extension des zones cultivées. Une des réponses adoptées par les agriculteurs de la zone semi-aride, face à la faiblesse des rendements, a été l'extension des cultures. Celle-ci favorise le développement des croûtes, avec pour corollaire l'augmentation des zones très érodées (photo n° 177).

L'étude de l'influence de ces modifications du milieu a été menée par ALBERGEL (1987) sur deux bassins versants du Burkina Faso : Kazanga et Kognere. Pour ces deux bassins, on dispose d'études hydropluviométriques classiques (1963 à 1965 et 1983 pour le premier, 1960 à 1962 et 1984 pour le second), de campagnes de mesures sous pluies simulées et de deux couvertures de photographies aériennes de bonne qualité et prises dans la même saison (décembre, janvier), l'une pour la période humide (mission IGN, 1956) et l'autre pour la période sèche (mission IGHV, 1980).

A partir des photographies aériennes, on a déterminé pour les deux périodes, les cartes d'états de surface des deux bassins (VALENTIN, 1985b). Ces cartes font apparaître des différences d'occupation des sols qui sont résumées dans le tableau 10 et la carte n°10 (voir page 180) pour le bassin de Kognéré.

En comparant les cartes de 1956 et 1980 du bassin de Kognéré, on constate que certains types de surface délaissés par les agriculteurs en 1956 sont maintenant exploités. En 1956, c'est principalement l'unité 4 (surface pelliculaire sans sables grossiers ni gravillons) qui est cultivée et accessoirement l'unité 7 (bas-fonds). En 1980, ce sont toujours les unités 4 et 7 qui sont les plus exploitées, mais elles tendent à l'être complètement et en permanence. Les jachères en sont presque totalement absentes. De plus, les zones naguère marginales, comme l'unité 2 (surface à sables grossiers et termitières) sont de plus en plus fréquemment mises en culture.

Les cartes des états de surface montrent également que :

- Sur le bassin de Kazanga, les contours des unités cartographiques restent sensiblement les mêmes, seules leurs divisions en zone cultivée et jachère sont modifiées.

- Sur le bassin de Kognéré, on assiste au contraire à une modification des surfaces occupées par les différentes unités. Cette évolution, qui va dans le sens d'une aridité croissante du milieu, a pu être qualifiée de "sahélisation" du bassin (ALBERGEL et VALENTIN, 1986 - photo n° 178). On observe par exemple, une extension des zones très érodées dont les superficies ont été multipliées par 20 entre 1956 et 1980 (carte n°10). Ces zones deviennent impropres à la culture et la végétation naturelle y est très dégradée. Si l'on excepte quelques zones, naturellement fragiles, déjà érodées en 1956, la totalité de cette extension résulte de la mise en culture.

La modification des états de surface entre 1956 et 1980 est résumée dans le tableau 11 (voir page 182).

Conséquences de la modification des états de surface sur le ruissellement

A partir des cartes des états de surface de 1956 et 1980, des séries pluviométriques de Manga (34 ans) pour le bassin de Kazanga et de Boulssa (24 ans) pour

Tableau 10
Occupation des sols, comparaison des états
en 1956 et 1980

Bassin	Période	Champs %	Jachère %	Savane arborée %
KAZANGA	1956	16,2	51,3	32,5
	1980	36,2	33,8	30,0
KOGNERE	1956	16,1	10,7	73,2
	1980	37,4	5,6	57,0

photo 165.
Traces de piétinement linéaire sur une dune fixée,
à 7 km d'un forage, région de Tessékéré, Ferlo,
Sénégal. A noter : les traces de brûlis, et les taches
claires circulaires signalant les surfaces de type
ERO (anciennes termitières arasées).



photo 166.
Surface de type DES, marquée par l'érosion
éolienne, favorisée par le piétinement du bétail,
dans une couronne de 0,5-2 km autour d'un forage,
Tessékéré, Sénégal. A noter : à l'arrière plan, à
droite, le *Leptadenia pyrotechnica* (Forsk.) Decne.



photo 167.
Brousse tachetée, peu pâturée, à 8 km d'un forage,
sur un sol cuirassé peu profond, région de Revane,
Ferlo, Sénégal. A noter : au centre, la surface de
type ERO, signalant la présence d'une termitière
arasée et, à l'arrière plan, le couvert dense de
Pterocarpus lucens Lepr. ex Guill et Perott.

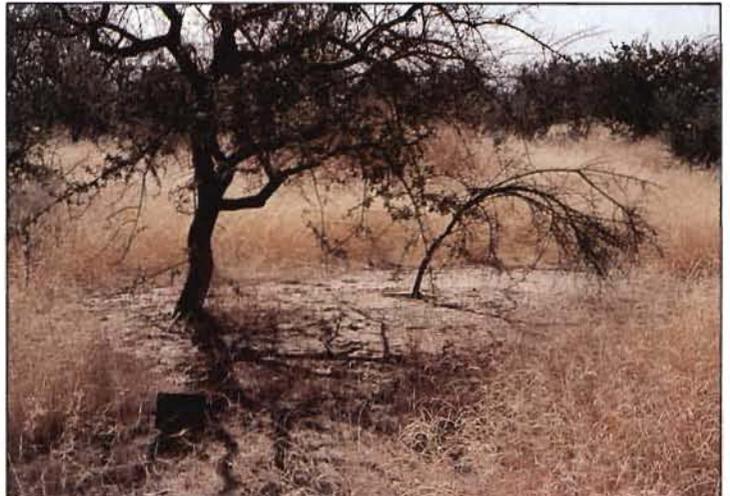




photo 168.
Même milieu, très pâturé, à 6 km du même forage.
A noter : à droite la surface ERO, érodée en micromarCHE,
passant, à gauche, à une surface de type RUI.

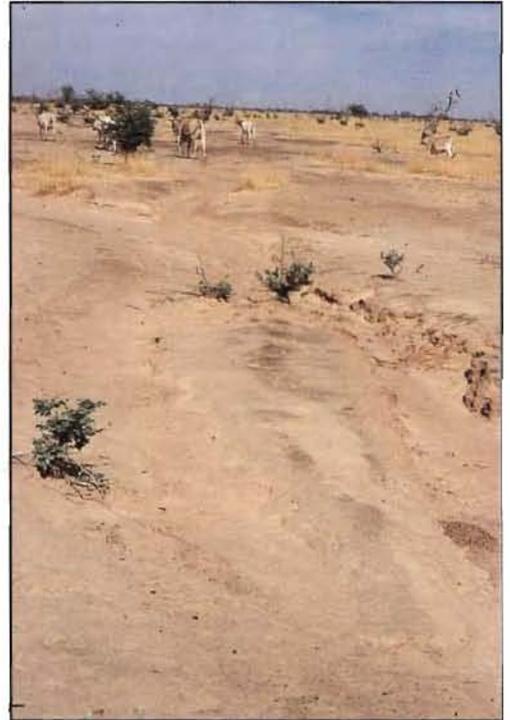


photo 169.
Même milieu, surpâturé, à 1 km du même forage.
A noter : la quasi-disparition du couvert arboré,
la nette diminution du couvert herbacé,
l'extension des surfaces de type ERO,
et l'apparition d'une griffe d'érosion.



photo 170.
Même milieu, surpâturé, à 1 km du même forage.
A noter : le décapage de la cuirasse
(surface de type G) par les érosions
en nappe et linéaire.



photo 171.
Même milieu, surpâturé, à 1 km du même forage.
A noter : une ravine, incisant une surface
de type ERO, à l'aval d'un versant surpâturé,
en fin de saison sèche.

Tableau 11

Bassin de Kognéré : unités de surface en 1956 et 1980

U.C.*	Surfaces élémentaires	% surface 1956	% surface 1980
2 et 3	■ Sol cultivé	2,2	15,0
	■ Végétation naturelle claire, graminées	19,6	3,7
	■ Sol nu	11,0	11,7
	■ Végétation naturelle en touffes	16,2	3,6
5, 6 et 7	■ Sol cultivé	1,0	5,4
	■ Sol nu	1,2	10,8
	■ Végétation naturelle	6,1	6,1
1	■ Sol cultivé	1,0	5,0
	■ Végétation naturelle	13,2	9,2
4	■ Sol cultivé	17,2	20,2
	■ Végétation naturelle	11,3	9,3

(*) : U.C. : unités cartographiques (carte 8)

Unité 1 : Cuirasses et surfaces gravillonnaires

Unité 2 : Surfaces à sables grossiers et termitières

Unité 3 : Surfaces à sables grossiers et termitières très érodées

Unité 4 : Surfaces pelliculaires sans sables grossiers ni gravillons

Unité 5 : Surfaces érodées à sables grossiers sans termitières

Unité 6 : Zones d'écoulement

Unité 7 : Bas-fonds.

(cf. carte 8, p. 153)

celui de Kognéré, on a reconstitué par le "modèle simulateur", les lames ruisselées en utilisant la carte de 1956 pour la période antérieure à 1969 et la carte de 1980 pour la période postérieure (ALBERGEL, 1987). Les coefficients de corrélation entre les lames reconstituées et observées varient entre 0,75 et 0,90.

Les deux chroniques de crues ainsi obtenues pour chacun des bassins permettent de constater que :

- pour le bassin de Kazanga, les deux nuages de points se confondent pratiquement avec seulement une légère tendance à l'augmentation du ruissellement pour la période sèche,
- pour le bassin de Kognéré, l'ensemble des pluies supérieures à 25 mm engendre des lames ruisselées nettement plus fortes pour la période 1969-1983.

Cet exemple montre que la diminution du total pluviométrique pendant la période 1969-1984 semble être largement compensée, dans le fonctionnement des petits bassins versants, par une modification des états de surface favorisant le ruissellement, surtout pour les

bassins situés au nord de l'isohyète 800 mm. Cette évolution des états de surface résulte de l'action conjuguée de la sécheresse et de la pression anthropique, sans qu'il soit possible de séparer l'influence de chacun de ces phénomènes qui sont très imbriqués. La comparaison des régimes hydrologiques des bassins de Kazanga, Kognéré et Waranienné (Côte d'Ivoire) (ALBERGEL et GIODA, 1986) tend cependant à montrer que la dégradation du milieu résultant de la mise en culture est exacerbée par le déficit pluviométrique.

Une étude similaire, actuellement en cours sur le bassin de Kountkouzout (Niger) devrait permettre de conforter ces résultats.

QUELQUES PARADES À LA DÉGRADATION

L'analyse des facteurs de réorganisation de surface (chapitre 12) facilite la recherche de parades techniques à ces dégradations. Toutefois, nous nous contenterons ici de les évoquer; de nombreux ouvrages consacrés au problème de la désertification traitent, en effet, largement de cette question (WARREN et MAIZELS 1977 ; ...). De plus, comme la formation des croûtes correspond au premier stade érosif, les méthodes de conservation des sols s'appliquent à la lutte contre les phénomènes d'encroûtement superficiel. Ce domaine, lui aussi, dépasse le cadre de cet ouvrage et a déjà donné lieu à la rédaction de traités qui font autorité (HUDSON, 1973, ...).

Le maintien et la reconstitution du couvert

Le couvert herbacé

Le couvert herbacé constitue la meilleure parade à la formation des croûtes sur les sols sableux, particulièrement abondants au Sahel. Aussi, dans la mesure du possible, doit-on s'efforcer de lutter contre toute forme de destruction de ce couvert : feux de brousse (photo n° 179), surpâturage, ... Il faut bien admettre cependant que ces "remèdes" bien connus peuvent difficilement être appliqués dans un contexte de sécheresse sévère et d'augmentation de la charge pastorale. De plus, les tentatives de régénération s'avèrent généralement décevantes. Certes, un travail très superficiel à la herse ou au scarificateur, effectué selon les courbes de niveaux permet un développement parfois spectaculaire d'un couvert à *Schoenefeldia gracilis*, même en l'absence de semis préalable (BOUDET, 1977), ou de *Pennisetum pedicellatum* après semis. Mais trop dépendant de la pluviométrie, ce couvert ne se maintient parfois qu'une année (SERPANTIE, TEZENAS DU MONTCEL et VALENTIN, 1988).



photo 172.
Même ravine que sur la photo 171,
après une saison des pluies.



photo 173.
Dégradation par le surpâturage
d'une ancienne brousse tachetée
de haut de versant,
bassin versant de Bidj, Burkina Faso.
A noter : la quasi-disparition
des couverts arbustifs et arborés
et l'extension des surfaces érodées

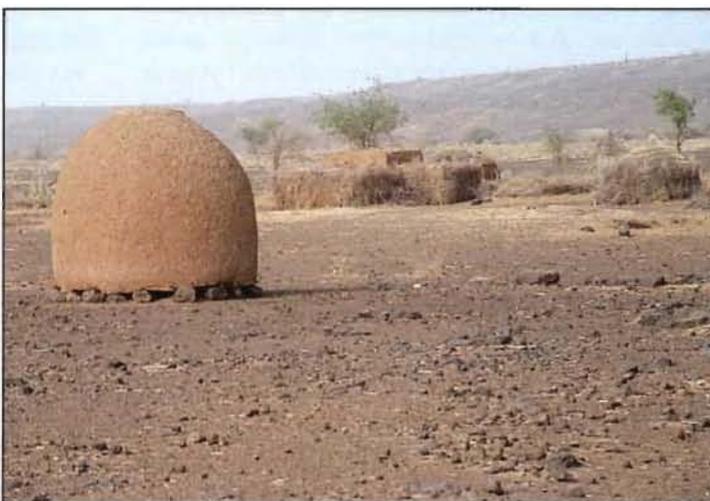


photo 174.
Campement de pasteurs,
bassin versant de Kountkouzout, Niger.
A noter : la surface érodée de type G,
conséquence du surpâturage.

Le couvert arboré

La part de l'arbre dans la défense de l'environnement est maintes fois évoquée : limitation du dessèchement du sol, attraction de l'activité faunique, meilleure infiltrabilité - à condition que la surface soit de type DES, rôle de brise-vent joué par les haies. Remarquons toutefois, à la suite de LEPRUN (1979), qu'un arbre isolé peut favoriser localement, par les turbulences qu'il provoque au niveau du sol, une érosion éolienne qui peut entraîner le déchaussement de ses racines. Les espèces très appréciées par les caprins sont, en outre, plutôt associées à des surfaces de type ERO, limitant ainsi l'infiltration. Il reste que l'arbre contribue à l'alimentation des hommes et du bétail, il fournit le bois de chauffe et le bois d'oeuvre... si bien que sa disparition du paysage est perçue comme un appauvrissement par la plupart des populations. Celles-ci, dans le contexte de sécheresse et d'augmentation démographique ne contribuent pas moins à la destruction du couvert arboré. Face à cette situation, les pouvoirs publics, souvent en collaboration avec des organisations non gouvernementales (O.N.G.), mettent en oeuvre des programmes de reboisement. En dépit de l'enthousiasme fréquent des participants, de nombreuses difficultés surgissent : le métier de forestier au Sahel réclame, en effet, compétence et patience. Evoquons les principales voies préconisées par les spécialistes (DELWAULLE, 1974) :

- **la régénération naturelle** : comme pour le couvert herbacé, elle n'est bien évidemment possible que dans le cas d'une pluviométrie favorable. Même si de jeunes fourrés à *Acacia ehrenbergiana*, *Acacia senegal*, parviennent à s'installer en saison des pluies sur des surfaces restées nues pendant plusieurs années, ils doivent ensuite affronter la première saison sèche, la concurrence pour l'eau, les risques de feux de brousse, les rongeurs, le bétail - *Sclerocarya birrea* se montre particulièrement sensible - et un défrichage toujours possible. Pour réduire ces risques, ces jeunes fourrés peuvent être mis en défens. Cette technique profite surtout à *Sclerocarya birrea* et aux acacias : *Acacia raddiana*, *Acacia albida*, *Acacia ehrenbergiana*, *Acacia laeta*, *Acacia sieberiana*, ...
- **la plantation** : elle nécessite de nombreuses interventions techniques. Tout d'abord, il est indispensable de choisir des sols suffisamment profonds; il n'est hélas pas rare d'observer des tentatives de plantation sur des cuirasses subaffleurantes. Ensuite, il convient de procéder à la préparation du sol : éventuel sous-solage, trouaison. Face à l'impossibilité de planter en semis, il faut avoir recours à des plants de pépinières. Par la suite et durant les trois premières années, la plantation doit faire l'objet d'une surveillance constante : sarclage manuel ou mécanique, installation et entretien d'une

clôture, protection contre les feux de brousse par la mise en place de pare-feux entretenus.

- **plantation irriguée** : c'est surtout à proximité des grands fleuves que les plantations arborées peuvent bénéficier d'une irrigation : au Sénégal, au Mali et au Niger (ARMITAGE, 1986). Elle concerne soit la production forestière, soit la mise en place de brise-vents le long des parcelles de cultures irriguées. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des essences importées comme *Eucalyptus camaldulensis* et certaines essences locales : le caïcedrat (*Khaya senegalensis*), le jujubier (*Ziziphus mauritiana*) et *Pakinsonia aculeata*. Ce dernier, souvent utilisé comme haies, présente l'avantage de ne pas être apprécié par le bétail.

De cette rapide présentation, il apparaît qu'en zone sahélienne, la reconstitution du couvert arboré requiert un personnel qualifié et motivé, ainsi que des moyens financiers.

Quelques pratiques culturelles

La couverture du sol par des résidus organiques

Nous avons déjà souligné l'importance des résidus de récolte, de la fumure organique et de l'activité faunique sur l'amélioration de l'état structural des sols. Certaines pratiques paysannes font appel à ces différents agents. Ainsi, l'action bénéfique des termites est bien connue de certaines populations (SERPANTIE et VALENTIN, 1985; MIETTON, 1986). Au nord du pays mossi, au Burkina Faso, les paysans recouvrent, en fin de saison des pluies, les zones dénudées et encroûtées, de branches (photos n° 180, n° 181 et n° 182), ou de bouses (photo n° 183). Cette concentration de matière organique attire les termites qui perforent ainsi la pellicule plasmique imperméable de surface. De plus, ces résidus constituent un obstacle au vent, facilitent le piégeage des sables, permettent ainsi la reconstitution d'un microhorizon sableux au-dessus de la pellicule plasmique, offrant de meilleures conditions de germination aux semences piégées.

Utilisation d'agents anticroustants

Depuis plus de trente ans, des recherches ont été entreprises concernant des substances qui consolideraient la structure du sol et limiteraient les risques d'encroûtement. Les produits testés ont été très variés :

- **polymères organiques** : le polyvinylalcool (PVA), le plus étudié, il ne donne pas de résultats satisfaisants sur les sols à chlorite (PAGE, 1979), émulsions bitumineuses (GABRIELS, MOLDENHAUER et DON KIRKHAM, 1973), polysaccharides, ...
- **composés métalliques** : gypse ou phosphogypse, efficace sur les sols riches en sodium (SHAINBERG,



photo 176.
Traces d'anciens billons érodés,
bassin versant de Kountkouzout, Niger.
A noter : l'alternance de bandes claires (ERO)
et foncées (G).



photo 175.
Etat d'un champ de brousse,
abandonné après la forte dégradation par les cultures,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : l'extension généralisée de la surface de type G,
et la non reconstitution de la brousse tachetée
milieu initial, visible en limite de champ.



photo 177.
Limite d'un champ et d'une jachère,
bassin versant de Kognéré, Burkina Faso.
A noter : sur la jachère, l'absence de recolonisation
par la végétation herbacée et la surface de type ERO.

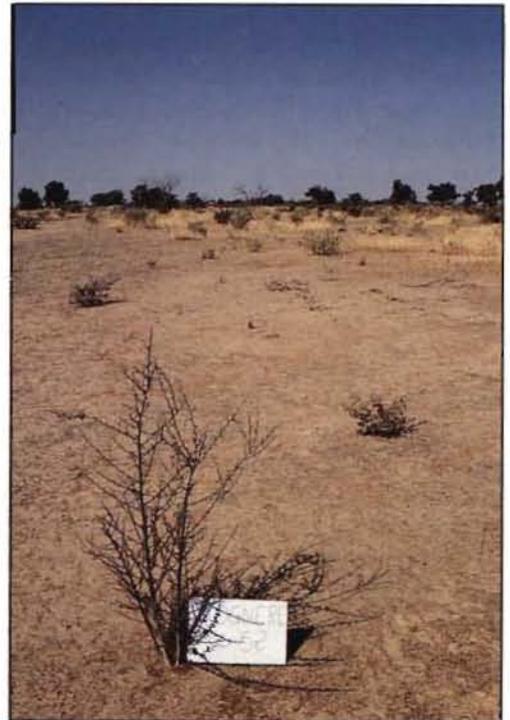


photo 178.
Détail de la jachère précédente.
A noter : le *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., épineux qui tend
à remplacer les combrétacées,
indice de "sahélisation" du milieu.

1985), polycations métalliques de fer ou d'aluminium, testés sur les sols limoneux des grandes plaines loessiques européennes (ROBERT, VENEAU et HERVIO, 1983 ; LE BISSONNAIS, 1985), ...

Toutefois, en dépit des nombreuses recherches entreprises dans ce domaine, la plupart des spécialistes considèrent qu'aucun conditionneur, à ce jour, n'est réellement exempt de défaut : coût trop élevé, augmentation des risques d'acidification, inefficacité envers la fissuration, ... En sorte que leur utilisation se limite à des situations très particulières : talus de routes, productions intensives, horticoles ou maraîchères, ...

Il n'existe donc pas de panacée pour "guérir" ce que MARCHAL (1983) appelle la "lèpre" des sols, c'est-à-dire l'extension des surfaces de type ERO.

Le travail du sol

Parmi les travaux du sol qui semblent adaptés aux risques d'encroûtement, signalons le semis en poquets (photos n° 184, n° 185 et n° 186) qui permet aux semences de conjuguer leurs forces lors de la levée pour rompre l'éventuelle croûte formée en surface après le semis. Le sarclage (photo n° 187) vise au moins autant à la destruction des croûtes apparues au cours du cycle qu'à l'élimination des "mauvaises herbes" (adventices). Ces pratiques correspondent à une utilisation extensive des terres. Devant l'augmentation démographique et la dégradation du milieu, il est clair que de nouvelles techniques plus intensives devront être adoptées. Nous avons vu toutefois (chapitre 10) que les agronomes ne s'accordent pas tous sur le choix des techniques à envisager : labour ou travail minimum du sol.

La lutte contre l'érosion et le ruissellement

L'une des solutions souvent adoptées en zone semi-aride pour réduire la vitesse de ruissellement et lutter contre l'érosion consiste à édifier des cordons pierreux (photos n° 188 à n° 191). Ces obstacles isohypses, filtrants, parfois cloisonnés permettent une meilleure maîtrise de l'eau, une réduction de l'érosion et l'amélioration du système de culture. L'édification de terrasses se limite aux milieux montagneux comme le Nord-Cameroun (photo n° 192). De nombreux auteurs ont attiré l'attention sur les implications socio-économiques des aménagements de l'espace, occasions fréquentes d'erreurs et d'échecs (MARCHAL, 1979 et 1986, MIETTON, 1981 et 1986 ; MARTINELLI et SERPANTIE, 1987), mais aussi de succès, pour peu

qu'à l'apprentissage d'une technique succède son appropriation collective (SERPANTIE, TEZENAS DU MONTCEL et VALENTIN, 1988).

Vers une nouvelle gestion de l'espace

A bien des égards, la sécheresse a entraîné une contraction de l'agriculture, et de l'activité humaine en général, dans les points bas, là où subsistent des réserves hydriques. Cette distribution normale en milieu prédésertique (photos n° 193 et n° 195) tend à s'étendre vers le sud. Une telle évolution soulève le problème de l'intensification de la gestion des bas-fonds grâce à l'irrigation (photos n° 194 et n° 196). Or, cette pratique pose elle-même un certain nombre de questions (PELISSIER, 1984) : choix entre la construction de barrages ou de diguettes filtrantes, évaluation des pertes par évaporation, des risques d'engorgement des retenues, et de salinisation des terres. Par ailleurs, il est à craindre que les équipements hydrauliques et l'aménagement des bas-fonds ne soient, dans bien des cas, la seule réponse apportée à la dégradation générale du milieu. En viendra-t-on à favoriser le ruissellement, voire l'érosion, sur les versants, comme dans le Negev (EVENARI, SHANAN et TADMOR, 1971; DE PLOEY et YAIR, 1985) ? Adopter une stratégie propre aux zones désertiques, n'est-ce pas implicitement admettre le caractère irréversible de la désertification ? L'attention grandissante portée sur les bas-fonds ne devrait pas faire perdre de vue la conservation des eaux et des sols le long des versants là où une restauration du milieu est encore possible.

Devant l'ampleur des problèmes, les solutions ne peuvent pas être analysées en simples termes techniques. Les bouleversements économiques et sociaux de ces trente dernières années ont profondément modifié les pratiques pastorales. Naguère, celles-ci n'entraînaient pas de surcharges durables (BERNUS, 1979). Aujourd'hui, dans bon nombre de cas, les conflits entre les agriculteurs et les éleveurs pourraient être évités (TOUTAIN 1979 ; SERPANTIE, 1985 ; SERPANTIE, MERSADIER et TEZENAS DU MONTCEL, 1985). A cet effet, il serait nécessaire non seulement d'édicter mais de mettre réellement en pratique de nouvelles règles de partage de l'espace : code foncier et code pastoral. Enfin, et l'on touche là au domaine politique, l'intensification nécessaire des systèmes de production passe inéluctablement par la revalorisation des revenus paysans.

photo 179.

Effet d'une piste pare-feu, décembre, région de Tessékéré, Ferlo, Sénégal. A noter : l'absence de protection du sol de la zone brûlée favorise les réorganisations de surface par les premières pluies.



photo 180.

Dépôt de branchages, à la surface du sol (de type ERC), par les cultivateurs, en vue d'attirer les termites dont l'action permet la destruction de la croûte, bassin versant de Bidi, Burkina Faso.

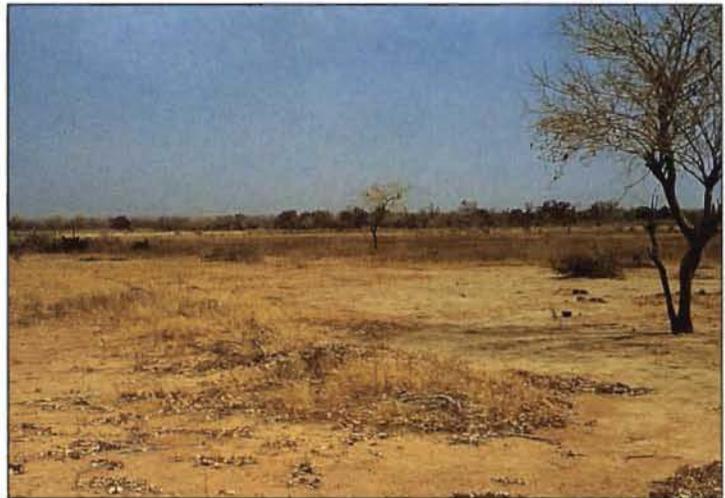


photo 181.

Même site, l'année suivante. A noter : le piégeage de sable éolien et de graines, par les branchages, a entraîné la formation artificielle d'une microbutte sableuse enherbée.



photo 182.

Microprofil de la microbutte sableuse précédente. A noter : les dépôts éoliens successifs (croûte EOL, surface de type DES) et les placages de termites en surface.



photo 183.
Dépôt, par les cultivateurs, de bouses, sur une surface de type ERO, en vue d'attirer les termites et de détruire ainsi la croûte, bassin versant de Bidi, Burkina Faso.



photo 184.
Levée de mil en poquet, région d'Oursi, Burkina Faso. A noter : l'effet synergique des jeunes pousses permet une rupture de la croûte (type RUI).



photo 185.
Microprofil d'un poquet de mil, région d'Oursi, Burkina Faso. A noter : la limite en V du travail du sol localisé et la structure conservée des agrégats sableux au sein du poquet.



photo 186.
Levée d'arachides soulevant
une croûte de ruissellement,
bassin versant de Binndé, Burkina Faso.



photo 188.
Cordon pierreux isohypse,
bassin versant de Kountkouzout, Niger.
A noter : la surface de type C1 du champ de mil.



photo 187.
Sarclage à l'iler, région d'Oursi, Burkina Faso.
A noter : le mouvement du sarcléur qui exerce une poussée
pour soulever et détruire la croûte.



photo 189.
Microprofil au travers d'un cordon pierreux
isohypse récent,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : la croûte de type EOL
au dessus de la croûte de type ERO.



photo 190.
Vue amont d'un cordon pierreux isohypse récent,
bassin versant de Bidi, Burkina Faso.
A noter : la croûte de type DEC de couleur grise.



photo 191.
Jupe sableuse protégée
par des cordons pierreux isohypses,
région de Badeguicheri, Ader Doutchi, Niger.



photo 192.
Culture en terrasses,
région de Mokolo, Cameroun.

photo 193.
 Concentration de la végétation
 en bordure du cours d'eau, station d'Azél,
 amont de la cuvette d'Agadez, Niger.
 A noter : la dénudation des surfaces de type G
 (reg) sur les plateaux et les versants.



photo 194.
 Irrigation de "jardins" à partir de la nappe alluviale, Agadez, Niger.



photo 196.
 Planches de haricots verts irrigués,
 bassin versant du Dounfing,
 région de Bamako, Mali.



photo 195.
 Concentration de l'habitat et de la végétation
 dans les points bas du paysage, Ader Doutchi, Niger.
 A noter : le reg sur les plateaux et les versants.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au terme de cet ouvrage, il importe de dégager un certain nombre de conclusions.

L'ORIGINALITÉ DE LA ZONE SAHÉLIENNE

Comme l'a montré la validation de la typologie proposée (cf. chapitre 15, §6), il semble possible de prévoir certaines caractéristiques de l'hydrodynamique superficielle à partir de l'identification des surfaces élémentaires.

Il est vrai que le Sahel se prête particulièrement bien à cette approche de par :

- la prépondérance sur les autres facteurs du milieu des caractères de surface quant aux processus de l'infiltration et du ruissellement,
- son nombre relativement réduit d'états de surface qui permet un *diagnostic* du fonctionnement hydrologique actuel,
- l'existence de relations génétiques entre les surfaces élémentaires qui doit faciliter le *pronostic* à plus long terme.

LES ÉTATS DE SURFACE DANS D'AUTRES MILIEUX

Les succès encourageants obtenus dans cette zone ne sauraient cacher les difficultés à appliquer ce type d'approche à d'autres milieux naturels comme la zone forestière où les fonctions de production du ruissellement sont conditionnées par les organisations internes de la couverture pédologique, ou la savane humide dont les états de surface sont sujets à des variations saisonnières importantes.

En revanche, il convient de souligner que cette typologie semble convenir aux milieux anthropisés d'autres zones climatiques, dès lors que la couverture du sol n'est plus assurée :

- les milieux cultivés de manière intensive, exemple : en zone soudanienne, une parcelle labourée, irriguée par aspersion (VALENTIN et RUIZ-FIGUEROA, 1987),
- les milieux urbains où l'on a mis en évidence une analogie certaine d'organisation et de comportement des surfaces avec celles de la zone sahélienne (JANEAU et BOUVIER, 1987).

PERSPECTIVES

En plus de progrès notables dans la compréhension des processus du ruissellement et de l'infiltration, les travaux ont également permis de soulever de nombreux problèmes qui sont autant de nouvelles voies de recherche. Les deux principales questions qui restent en suspens ont trait :

- Aux mécanismes de l'infiltration en milieu fortement anisotropique (dont les propriétés varient selon la direction considérée), qui nécessiteront une étude physique plus fine pour aboutir à une modélisation satisfaisante.
- Au problème de la transposition des mesures ponctuelles à des surfaces plus vastes. Des travaux, qui associent une approche physique à l'approche statistique, sont actuellement en cours pour déterminer cet "effet d'échelle".

Enfin, il nous paraît nécessaire de préciser que la typologie proposée dans cet ouvrage n'est pas figée. Elle correspond, en effet, à l'état actuel de nos connaissances. Dépendant de l'acquis scientifique, elle est, par nature, susceptible d'amélioration et d'extension.

BIBLIOGRAPHIE

- ACCT, 1978a - Agence de Coopération Culturelle et Technique. Nomenclature et échange de données pédologiques par ordinateur. A.C.C.T., Programme de Coopération Scientifique et Technique. Paris. 192p.
- ACCT, 1978b - Agence de Coopération Culturelle et Technique. Vocabulaire de l'environnement pédologique tropical. A.C.C.T., Programme de Coopération Scientifique et Technique. Paris, 81p.
- AFES, 1987 - Association Française pour l'Etude du Sol. Référentiel Pédologique Français. 1ère Proposition. AFES/INRA. Plaisir, 131p., multigr.
- AGASSI (M.), MORIN (J.), SHAINBERG (I.), 1985. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 186-190, 2 tabl., 5 fig., 16 réf.
- ALBERGEL (J.), 1986. Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso : Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. CIEH. Ouagadougou.
- ALBERGEL (J.), 1987a. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. ORSTOM Montpellier.
- ALBERGEL (J.), 1987b. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km² Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse doct. Univ. Paris VI, 336 p., multigr.
- ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), 1984a. Calage du modèle simulateur. Prévision de la crue décennale sur le bassin versant de Binnde. ORSTOM, Ouagadougou, 65 p., multigr.
- ALBERGEL (J.), BERNARD (A.), 1984b. Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de Kazanga. ORSTOM Ouagadougou, 104 p., multigr.+ annexes.
- ALBERGEL (J.), GIODA (A.), 1986. Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. XIX. Journées de l'Hydraulique, Paris, Soc. Hydrotechnique de France 1.9.1 - 1.9.6, 3 tabl., 4 fig., 18 réf.
- ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.) VALENTIN (C.), 1986. L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et séminaires, pp 25-48.
- ALBERGEL (J.), THEBE (B.), 1986. Pluie naturelle - pluie simulée. Quelle différence sur le ruissellement? ORSTOM Montpellier, multigr.
- ALBERGEL (J.), VALENTIN (C.), 1986. "Sahélisation" d'un petit bassin versant : Boulsa Kognere au centre nord du Burkina Faso. In : Colloque Nordeste-Sahel. I.H.E.A.L. Paris, sous presse.
- ALPEROVITCH (N.), DAN (J.), 1973. Chemical and geomorphological comparison of two types of loessial crusts in the Central Neguev (Israël), *Isr. J. Agric. Res.* 23 (1) : 13-16, 2 tabl., 3 photos, 11 réf.
- ARMITAGE (F.B.), 1986. Foresterie irriguée en pays arides et semi-arides : une synthèse. CRDI, Ottawa, 192 p.
- ASSELINE (J.), VALENTIN (C.), 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. -ORSTOM, sér. Hydrol.*, XV, 4, pp 321-349.
- AUBERT (G.), 1948. Observations sur les sols de l'Office du Niger. ORSTOM, Paris, multigr., 4p.
- AUBERT (G.), 1965. Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la section de Pédologie de l'ORSTOM. *Cahiers ORSTOM, sér. Pédol.*, 3 (3) : 269-288.
- AUBERT (G.), 1976. La morphologie des sols affectés par le sel, reconnaissance et prévision, surveillance continue. in : *Prognosis of Salinity and Alkalinity. Sols Bulletin n° 31, FAO, Rome*, pp. 187-194.
- AUBERT (G.), BOULAIN (J.), 1972. La Pédologie. P.U.F., Coll. "Que sais-je", n° 352, PARIS, 128p.
- AUDRY (P.), ROSSETTI (Ch.), 1962. Observations sur les sols et la végétation en Mauritanie du Sud-Est et sur la bordure adjacente du Mali (1959 et 1961). Prospection écologique. Etudes en Afrique Occidentale. Projet du fonds spécial des Nations-Unies relatif au criquet pèlerin. F.A.O. Rome - 267p., multigr., 33 fig., 70 réf., 26 photos, 1 carte h.t. à 1/200.000.
- BACHELIER (G.), 1978. La faune des sols, son écologie et son action. ORSTOM, Coll. Initiations - Documentations Techniques n° 38. Paris, 391p., 52 fig., 1088 réf., 4 pl.photo h.t.
- BAGNOLD (R.A.), 1937. Transport of sand by wind. *Geogr. Journ.*, 89-436.
- BARDINET (C.), 1984. Télédétection par satellites Landsat et Meteosat. Cartographie des milieux physiques au Sahel africain (Mali). *Bull. de la Soc. Languedoc. de Géographie* 18 (3-4) : 147- 158, 2 fig., 18 réf.

- BARRAL (H.), BENEFICE (E.), BOUDET (G.), DENIS (J.P.), DE WISPELAERE (G.), DIAITE (I.), DIAW (O.T.), DIEYE (K.), DOUTRE (M.P.), MEYER (J.F.), NOEL (J.), PARENT (G.), PIOT (J.), PLANCHENAUT (D.), SANTOIR (C.), VALENTIN (C.), VALENZA (J.), VASSILIADES (G.), 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. ACC-GRIZA-LAT, GERDAT-ORSTOM, Paris, 172 p.
- BARRO (S.E.), 1981. Esquisse d'une cartographie des sols de Sabouna (République de Haute-Volta) en vue de leur aménagement et mise en valeur. D.A.A., Nancy, doc. multigr.
- 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. ACC-GRIZA-LAT, GERDAT-ORSTOM, Paris, 116 p.
- BARTH (H.K.), 1982. Accelerated erosion of fossil dunes in the Gourma region (Mali) as a manifestation of desertification. in : YAALON (D.H.) édit., *Aridic Soils and Geomorphic processes*, CATENA SUPPL. n° 1 : 211-219, 4 fig., 5 réf.
- BEN-HUR (M.), SHAINBERG (I.), BAKKER (D.), KEREN (R.), 1985. Effect of soil texture and CaCO₃ content on water infiltration in crusted soil as related to water salinity. *Irrig. Sci.* 6 : 281-294, 6 fig., 20 réf.
- BERNUS (E.), 1979. Exploitation de l'espace et désertification en zone sahélienne. *Trav. de l'Institut de Géographie de Reims*, 4039-40 ; 49-59, 21 réf.
- BERNUS (E.), 1984. Les causes de la désertification : les thèses en présence. *Bull. Soc. Languedocienne de Géographie*, 18 (3-4) : 159-165, 19 réf.
- BERTON (S.), 1988. La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et microbarrages en Afrique de l'Ouest. GREC-ACCT-Ministère de la Coopération, Paris, 474 p.
- BERTRAND (R.B.), PARR (J.F.), 1960. Development of a portable sprinkling infiltrometer. *Trans. of the VIIth Int. Cong. of Soil Sci.*, Madison, VI, 4, pp 433-440.
- BESLON (M.), 1960. Bassin expérimental de BARLO. Campagne 1959. ORSTOM Fort-Lamy, 35p., 28 fig., multigr.
- BILLE (J.L.), 1974. Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : 1972, année sèche au Sahel. *La Terre et la Vie*, 28 (1) : 5-20, 10 réf.
- BISHAY (B.G.), STOOPS (G.), 1975. Micromorphology of irrigation crusts formed on a calcareous soil of the mechanized farm. *North West Egypt. Pédologie*, 25 (2) : 143.
- BLIC (P. de), 1979. Micromorphologie de la partie supérieure des sols en zone de culture semi-mécanisée dans le centre ivoirien. *Univ. Dijon, Institut des Sci. de la Terre*, 58p., multigr., 12 réf., + annexes.
- BOCQUIER (G.), 1968. Biogéocénose et morphogenèse actuelle de certains pédiments du bassin tchadien. *Int. Congr. Soil. Sci.* 9, 1968 - Adélaïde, Vol. IV, pp. 605-614.
- BOCQUIER (G.), 1971. Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. *Interprétation biogéodynamique*. Thèse es Sci. Nat. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 364 p.
- BOCQUIER (G.), GAVAUD (M.), 1964. Etude pédologique du Niger Oriental. ORSTOM, Dakar, 80 + 267 p., multigr., 39 tabl., 51 fig. Carte en couleurs h.t. à 1/500.000ème.
- BOCQUIER (G.), GAVAUD (M.), BOULET (R.), 1964. Etude pédologique du Niger Central. Rapport général. ORSTOM, Dakar, 211p, multigr., + annexes, 21 pl., 17 tabl.
- BOIFFIN (J.), 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.* 27 (4) : 447-463.
- BOIFFIN (J.), 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 320p. + annexes.
- BOIFFIN (J.), SEBILLOTTE (M.), 1976. Climat, stabilité structurale et battance. *Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ*. *Ann. Agron.* 27 (3) : 295-325.
- BOIFFIN (J.), MONNIER (G.), 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation des critères de fertilité physique. *Bull. Tech. Info.*, n° 370-372, 401-407, 1 tabl., 2 fig., 18 réf.
- BOIFFIN (J.), PAPY (F.), PEYRE (Y.), 1986. Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux. INAPG/INA-Ministère de l'Agriculture, 154p. + annexes.
- BOND (R.D.), 1964. The influence of the microflora on the physical properties of soils. II. Field studies on water repellent sands. *Austr. J. Soil Res.*, 2 : 123-231 : 7 fig., 6 réf.
- BOUDET (G.), 1972. Désertification de l'Afrique tropicale sèche. *Adansonia*, série 2, 12 (4) : 505-524, 3 tabl., 8 fig., 19 réf.
- BOUDET (G.), 1977. Les pâturages sahéliens. Les dangers de dégradation et les possibilités de régénération. Principes de gestion améliorée des parcs sahéliens. in : *Les systèmes pastoraux sahéliens*. Etude FAO n° 5 : Production Végétale et Protection des Plantes. F.A.O., Rome : pp. 169-231.
- BOUDET (G.), 1984. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. 4e édition révisée. Ministère des Relations Extérieures. Coopération et

- Développement. I.E.M.V.T. Manuels et Précis d'Élevage n° 4. Paris, 266 p., 15 fig., 6 cartes, 8 planches, 21 tabl., 28 photos, 159 réf., + annexe.
- BOUDET (G.), 1984b. Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel. *Bull. Soc. Languedoc. Géograph.* 18 (3-4) : 167-177, 1 tabl., 3 fig., 9 réf.
- BOUGERE (J.), 1979. L'état de dégradation des formations sableuses du Sahel voltaïque ou l'urgence d'une intervention. *Trav. de l'Inst. de Géogr. de Reims.* 314, pp 91-101.
- BOULAIN (J.), 1966. La cartographie des sols et la Pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IV (1) : 3-7.*
- BOULET (R.), 1966. Observations pédologiques dans le Tamesna Oriental (République du Niger). *Relations sol-végétation. ORSTOM, Dakar, multigr., 67p., 6 tabl., 25 fig., 33 réf., + annexes.*
- BOULET (R.), 1968. Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord. ORSTOM, Dakar, multigr., 351p., 43 tabl., 34 fig., 1 carte h.t. à 1/500.000 + annexes.
- BOULET (R.), 1974. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Thèse d'Etat. Univ. de Strasbourg. ORSTOM, Coll. Mémoires n° 85, 272p., 20 tabl., 73 fig., 17 pl., 244 réf.
- BOULET (R.), 1976. Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. Ministère de la Coopération/ORSTOM, Paris, 97p., 36 réf.
- BOULET (R.), 1987. Développement des systèmes de transformation aux dépens des couvertures pédologiques initiales dans l'Afrique de l'Ouest. in : *Sols et Eaux, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. ORSTOM/Banque Mondiale, p. 26.*
- BOULET (R.), GUICHARD (E.), KALOCA (B.), LEPRUN (J.C.), MOREAU (R.), RIEFFEL (J.M.), 1970. Etude pédologique de la Haute-Volta. Rapport général de synthèse. ORSTOM, Dakar, 30p., multigr., + 5 cartes h.t.
- BRABANT (P.), GAVAUD (M.), 1985. Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun. ORSTOM, Paris, M.E.S.R.E.S. et I.R.A., Cameroun, Collection Notice Explicative, n° 103, 285p.
- BRAUDEAU (E.), 1987. Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sc. du sol, 25 (2) : 85-93, 1 tabl., 4 fig., 11 réf.*
- BREWER (R.), 1964. *Fabric and mineral analysis of soils.* J. Wileys & Sons (edit.). New York, London, Sydney, 470p.
- BRICQUET (J.P.), CASENAVE (A.), DELFIEU (J.M.), GATHÉLIER (R.), 1987. Etude du rapport pluie-débit sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin d'Agassaghas. ORSTOM Niamey.
- BRUAND (A.), 1985. Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerois. Thèse, Univ. Paris VII, 225p. + annexes.
- BRUAND (A.), 1986. Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral, utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Sc. du sol, 24 (4) : 351-362, 7 fig., 29 réf.*
- 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, 21p. multigr.
- BRUNET-MORET (Y.), 1966. Complément à l'étude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : République du Tchad. ORSTOM/CIEH, Paris, multigr.
- BRUNET-MORET (Y.), CHAPERON (P.), LAMAGAT (J.P.), MOLINIER (M.), 1986. Monographie hydrologique du fleuve Niger. Collection ORSTOM "Monographies Hydrologiques" n° 8, Paris.
- CAMARA (L.), 1981. Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse Univ. Paris VII, 155p.
- CASENAVE (A.), 1982. Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 4, pp 207-227.*
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), 1978. Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique Tropicale. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols forestiers. Campagne 1977- ORSTOM, CIEH, ABIDJAN, 62p., multigr., 32 fig., 29 réf.
- CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), SIMON (J.M.), 1982. Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 4, pp 229-252.*
- CERRI (C.C.), FELLER (C.), CHAUVEL (A.) - à paraître. Evolução das principais propriedades de um latossolo vermelho escuro cultivado por 12 e 50 anos com cana-de-açúcar.
- CHAMARD (P.C.), COUREL (M.F.), 1977. Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes. Secteur de Menegon-Boli (Département du Sahel - Sous-Préfecture de l'Oudalan). *Trav. de*

- l'Institut de Géographie de Reims, n° 37-40 : 75-90, 3 tabl., 6 fig., 17 réf.
- CHAPMAN (G.), 1948. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation. *Trans. of the Amer. Geophys. Union*, 29 (5) : 644-670, 1 tabl., 4 fig., 13 réf.
- CHARREAU (C.), 1969. Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance. *Agron. Trop.*, 24 (9) : 836-842.
- CHARREAU (C.), TOURTE (R.), 1967. Le rôle des facteurs biologiques dans l'amélioration du profil cultural dans les systèmes d'agriculture traditionnelle de zone tropicale sèche. in : *Actes du Colloque sur la fertilité des sols tropicaux*. Tananarive, 19-25 novembre 1967. CFS/TAN/II : 1-20, 10 tabl., 44 réf.
- CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.* 26 (9) : 903-978 (11) : 1183-1247.
- CHAUVEL (A.), 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouge de moyenne Casamance (Sénégal). Thèse d'Etat, Univ. de Strasbourg. ORSTOM, Paris, Coll. Trav. et Doc., n° 62, 532p.
- CHEVALLIER (P.), 1982. Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIX, 4, pp 253-297.
- CHEVALLIER (P.), 1986. Simulation de pluie, télé-détection, modélisation. Exemple de la Mare d'Oursi - Burkina-Faso. *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier*. Coll. ORSTOM Colloques et Séminaires, pp. 90-104.
- CHEVALLIER (P.), VALENTIN (C.), 1984. Influence des microorganisations 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.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.), 1985. Pluies et crues au Sahel. *Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso)*. 1976-1981. ORSTOM, Paris, Collection Travaux et Documents n° 190 - 251p., 5 planches photos, 58 réf., 2 cartes h.t. à 1/50.000.
- CHEVALLIER (P.), LAPETITE (J.M.), 1987. Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier*. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires. p.53-64.
- CHEVERRY (C.), FROMAGET (M.), BOCQUIER (G.), 1972. Quelques aspects micromorphologiques de la pédogenèse de polders conquis sur le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 10 : 373-387.
- C.I.E.H., 1985. Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les états membres du C.I.E.H. Rapport de synthèse par le département Hydrologie. C.I.E.H., sér. Hydrol.
- CLOS-ARCEDEC (M.), 1956. Etude sur photographie aérienne d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée. *Bull. I.F.A.N., Dakar*, 18 (3) : 677-684.
- COLLINET (J.), 1984. Hydrodynamique superficielle et érosion comparée de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire) in : *Challenges in African Hydrology and Water Resources*, IASH Publ. n° 144, pp 499- 516.
- COLLINET (J.), 1986. Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier*. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, p.117-153.
- 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.), 1979a. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. *Nouvelles perspectives. Applications agronomiques*. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVII, 4, pp 283-328.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979b. Un schéma des interrelations hydrodynamiques dans les milieux naturels et cultivés, valorisation des données morphologiques. in : *Informatique et Biosphère, Actes du Colloque d'Abidjan*, pp. 155-177, 5 tabl., 10 fig., 22 réf.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1985. Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation. in : *Challenges in African Hydrology and Water Resources*. IAHS Publ., n° 144, pp. 451-461, 6 tabl., 3 fig., 17 réf.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), ASSELINE (J.), CHEVALLIER (P.), SICOT (M.), 1980. Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Rapport de terrain sur la première mission "Mare d'Oursi". ORSTOM Abidjan, 14 p., multigr., 15 fig., 15 tabl.
- COUREL (M.F.), 1977. Etude géomorphologique des dunes du Sahel (Niger Nord-Occidental - Haute-Volta Septentrionale). Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, 284 p., 54 fig., 25 pl., photos.
- COUREL (M.F.), 1983. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies

- par les satellites. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Paris I, 407p., 44 tabl., 164 fig., 25 images, 7 planches photos, 4 cartes.
- C.P.C.S., 1967. Commission de Pédologie et de classification des sols. Classification des sols. E.N.S.A. Grignon. Lab. Pédologie- Géologie, 87p., multigr.
- DABIN (B.), 1948. Note sur les efflorescences salines observées dans les régions de Niono et Sokolo. ORSTOM, Ségou, multigr., 26 p. + annexes.
- DAGET (P.), GODRON (M.), 1979. Vocabulaire d'Ecologie. 2e édition revue et complétée. A.C.C.T. / C.I.L.F./C.N.R.S. - HACHETTE - Paris - 300p.
- DAVEAU (S.), 1965. Dunes ravinées et dépôts du quaternaire récent dans le Sahel mauritanien. Rev. Géogr. Afrique Occidentale : pp. 7-47, 2 tabl., 6 fig., 6 pl. photos, 15 réf.
- DE PLOEY (J.), 1982. A stemflow equation for grasses and similar vegetation. CATENA, 9 : 139-152, 6 réf.
- DE PLOEY (J.), 1983. Runoff and rill generation on sandy and loamy top soils. Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd 46, pp. 15-23, 2 fig., 24 réf.
- DE PLOEY (J.), 1984. Stemflow and colluviation : modeling and implications. PEDOLOGIE, 34 (2) : 135-146, 1 tabl., 4 fig., 15 réf.
- DE PLOEY (J.), BRYAN (R.M.), 1986. Time to runoff as a function of slope angle - in : Assessment of surface sealing and crusting. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOODT (M.) édit., Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 106- 119, 8 fig., 1 photo, 17 réf.
- DEBANO (L.F.), 1969. Water repellent soils : a world-wide concerning in management of soil and vegetation. Agric. Sci. Rev., 7 (2) : 11-18, 3 fig., 6 réf.
- DEGOULET (R.), 1984. Etude des pluies journalières de fréquence rare au Mali, en Mauritanie et au Sénégal. CIEH, sér. Hydrol., multigr.
- DELWAULLE (J.C.), 1974. Le rôle du forestier dans l'aménagement du Sahel. in : Le Sahel : bases écologiques de l'aménagement - Notes Techniques du MAB, UNESCO, Paris, pp. 41-53.
- DESPHANDE (T.L.), GREENLAND (D.J.), QUIRK (J.P.), 1964. Influence of iron and aluminium oxide on the surface change of soil and clay materials. Intern. Soil Sci. Trans. 8th, Bucarest, Roumanie, 3 : 1213-1225.
- DOCUMENTATION FRANÇAISE (LA), 1975. Notes et études documentaires n°4216-4217. La sécheresse en zone sahélienne. Causes. Conséquences. Etude des mesures à prendre. Secrétariat général du Gouvernement. Académie des Sciences d'Outre-Mer.
- DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRE (J.), HERBAUD (J.), 1972. Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969 - ORSTOM, Paris, 916p.
- DUBREUIL (P.), MORELL (M.), SECHET (P.), 1975. Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 13 (1) : 13-36, 8 fig., 6 tabl., 5 réf.
- DUCHAUFOR (P.), 1970. Précis de Pédologie. 3e édition entièrement refondue, MASSON & Cie édit. Paris, 481p.
- DULEY (F.L.), 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 4, 60-64.
- DULIEU (D.), GASTON (A.), DARLEY (J.), 1977. La dégradation des pâturages de la région de N'Djamena (République du Tchad) en relation avec la présence de Cyanophycées psammophiles. Etude préliminaire. Rev.Elev.Méd.Vét.Pays Trop., 30 (2) : 181-190, 5 tabl.
- EKERN (P.C.), 1950. Raindrop impact as the force initiating soil erosion. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 15 : 7-10.
- ESCADAFAL (R.), 1981. Apport de la télédétection spatiale à la cartographie des ressources en sols de la région de Medenine (Sud Tunisien). Division des Sols, Tunis, E-S n° 189, 40p., multigr., 2 tabl., 7 fig., 19 réf.
- ESCADAFAL (R.), 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface du sol dans les régions arides. Sols, n° 5 : 21-27.
- EVANS (D.D.), 1954. Effect of prewetting and incubation of soil on aggregate analysis. Soil Sci.Soc.Amer. Proc. 36 : 823-827.
- EVENARI (M.), YAALON (D.H.), GUTTERMAN (Y.), 1974. Note on soils with vesicular structure in deserts. Z. Geomorph. N.F., 18 (2) : 163-172, 11 réf.
- FAO, 1973. La zone sahélienne, bibliographie sélectionnée pour l'étude de ses problèmes. FAO Library n°9. Rome.
- FAO-UNESCO, 1975. Carte mondiale des sols, 1/5.000.000e Vol. I : Légende, Paris, 62p.
- FARRES (P.J.), 1978. Role of aggregate size and time in the soil crusting process. Earth Surface Processes, 5 (3) : 243-254.
- FARRES (P.J.), 1986. Feed back relationships between aggregate stability, rainsplash erosion and soil crusting. in : Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOOOT (M.) ed. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 82-90, 8 fig., 29 réf.
- FARRES (P.J.), 1987. The dynamic of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. CATENA, 14 : 119-130, 2 tabl., 7 fig., 28 réf.

- FATTON (A.), 1976. Influence de la nature de la fraction argileuse sur quelques caractéristiques mécaniques des matériaux granuleux. Bull. techn. du Génie Rural. Antony, n° 119, 67 p., multigr.
- FEODOROFF (A.), 1960. Evolution de la stabilité structurale (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. Ann. Agron. 11 (6) : 651-659, 2 fig., 3 réf.
- FEODOROFF (A.), 1965. Mécanismes de l'érosion par la pluie. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.. 7 (2) : 149-163, 7 tabl., 7 fig. 55 réf.
- FIES (J.C.), 1970. Recherche des paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. Sci. Sol, 2 : 27-37.
- FIGUEIRA (H.), STOOPS (G.), 1983. Application of micromorphometric techniques to the experimental study of vesicular layer formation. Pédologie, 23 (1) : 77-89, 3 tabl., 7 fig., 11 réf.
- FOREST (F.), 1984. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. IRAT/CIRAD, St-Clément-la Rivière, 61 p., multigr.
- FRANKEN (H.), HURTMANN (E.H.), 1986. The influence of fertilization on soil surface sealing and crusting of a loess soil in : Assessment of Surface sealing and crusting. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOODT (M.), édit., Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 56-63, 6 fig., 4 réf.
- GABRIELS (D.M.), MOLDENHAUER (W.C.), DON KIRKHAM, 1973. Infiltration, hydraulic conductivity and resistance to water drop impact of clod beds as affected by chemical treatment. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37 : 634-637, 4 tabl., 15 réf.
- GALLAIS (J.), 1967. Le Delta intérieur du Niger et ses bordures. Etude morphologique. CNRS, Centre de Recherches et Documentation Cartographiques et Géographiques. Mém. et Doc., Nouvelle Série, vol. 3, 153p., 30 fig., 16 pl. photos, + 1 carte h.t. à 1/200.000e.
- GANRY (F.), BERTHEAU (Y.), 1982. Gestion des résidus de récolte et économie de l'azote au Sénégal. in : le recyclage des résidus organiques en Afrique. Bull. Pédol. FAO, n° 47, pp. 37-53, 2 tabl., 20 réf.
- GATHELIER (R.), CASENAVE (A.), BRICQUET (J.P.), DELFIEU (J.M.), 1987. Etude des relations pluies-débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin sahélien (Banigorou - Rép. Niger). ORSTOM, Niamey, 24 p., 22 fig., + annexes, multigr.
- GATHELIER (R.), GIODA (A.), 1986. Etude des relations Pluies- Débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin sahélien (Kountkouzout - Niger). ORSTOM Niamey, 26 p., multigr.+ annexes.
- GAVAUD (M.), 1968. Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. Essai de systématique régionale. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, 3/4, pp 271-307.
- GAVAUD (M.), 1971. Première tentative d'inventaire des principales toposéquences en zone tropicale à longue saison sèche. in : ORSTOM, bull. liaison, thème B, n° 2, pp. 11-12.
- GAVAUD (M.), 1971b. Programme d'étude typologique et génétique de sols sableux (sols ferrugineux peu lessivés, sols brun-rouge, sols bruns). in : ORSTOM, Paris, Bull. Liaison thème B, n° 1, pp. 25-30, 3 cartes, 8 réf.
- GAVAUD (M.), 1975. Sols et pédogenèse au Niger méridional. ORSTOM, Paris, multigr., 1107p. + annexes.
- GAVAUD (M.), 1977. Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. ORSTOM, Paris, Collection Travaux et Documents n° 76, 102p., 4 fig., 37 réf.
- GAVAUD (M.), BOULET (R.), LEVEQUE (A.), 1974. Les couvertures de sols soudano-sahéliennes du Tchad au Sénégal. Principes successifs de caractérisation et d'interprétation. in : C.R. 10. Cong. Intern. Sci. de Sol. Moscou, VIII : 123-130.
- GERARD (C.J.), 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29 (6) : 641-644.
- GIFFORD (R.O.), THRAN (D.F.), 1974. Bonding mechanisms for soil crusts : part II. Strength of silica conservation in : CARY (J.W.), EVAN (D.D.) édit., Soil Crusts. Agricult. Exp. Station, Univ. of Arizona, Tucson, Techn. Bull. 214 : pp. 28-30.
- GILLET (H.), 1980. Observations on the causes of devastation of ligneous plant in the Sahel and their resistance to destruction. in : Browse in Africa, the Current state of Knowledge. LE HOUEROU (édit.), I.L.C.A., 491p.
- GIODA (A.), 1983. Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Korhogo - Côte d'Ivoire). ORSTOM, Abidjan, 64 p., multigr.
- GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.P.), 1981. Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XVIII, n°4, pp. 195-280.
- GOYAL (M.R.), NELSON (G.L.), CARPENTIER (T.C.), 1979. Mechanical properties of soil crust. Am. Soc. of Agr. Eng. paper, n° 79-1547, 16p., 3 tabl., 4 fig., 8 réf.

- GRIFFITH (A.A.), 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 221 (A) : 153-198.
- GROUZIS (M.), ALBERGEL (J.), 1986. Du risque climatique à la contrainte écologique : incidence de la sécheresse sur les productions végétales et le milieu au Burkina-Faso. ORSTOM, Montpellier, 15 p. multigr., 4 tabl., 5 fig., 28 réf.
- GUNN (R.), KINZER (G.D.), 1949. The technical velocity of fall for water droplets. *J. Met.*, 6, pp. 243-248.
- HAGEDORN (H.), GIESSNER (K.), WEISE (O.), BUSCHE (D.), GRUNERT (G.), 1977. Dune stabilization. A survey of literature on dune formation and dune stabilization. Univ. Würzburg/G.T.Z., Eschbom, Rep. Fed. d'Allemagne, 149p., + annexes.
- HAINES (W.B.), 1923. The volume changes associated with variations of water contents in soil. *J. Agric. Sci.* 13 : 296-310.
- HANKS (R.J.), 1960. Soil crusting and seedling emergence. in : VIth Intern. Cong. of Soil Sci., Madison, 134 : 340-356, 2 tabl., 4 fig., 9 réf.
- HENIN (S.), 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse, Imprim. Nat., Paris, 70p.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. *Cong. Int. Science du Sol*, VI, Paris, Vol B : 49-52.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), COMBEAU (A.), 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 9 (1) : 73-92.
- HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. Le profil cultural. MASSON, Paris, 2è édition (1ère édi. : 1960), 332p.
- HERWITZ (S.R.), 1986. Infiltration excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth surface Processes and Landforms*. 11 : 401-412.
- HILLEL (D.), 1960. Crust formation in loessial soils. in : *Proc. of the VII Intern. Congr. of Soil Sci.*, MADISON, 330-336, 6 fig., 4 réf.
- HJUSTRÖM (F.), 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. *Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsala*, 25 : 293-305, et 442-452, 8 tabl., 18 fig., 20 réf.
- HOFMAN (G.), DE LEENHEER (L.), APPELMANS (F.), 1974. Relationship between the aggregate instability and soil texture, organic matter content, pH, total porosity and pore size distribution. *Mcd. Fac. Land Gent*. 39 (4) : 1622-1634, 2 tabl., 16 réf.
- HOOGMOED (W.B.), 1986. Crusting and sealing problems on West African soils. in : *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting*, 1985. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOODT (M.), édit., Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation. pp : 48-55 - 3 tabl., 3 fig., 9 réf.
- HUBERT (B.), LEPRUN (J.C.), POULET (A.), 1977. Importance écologique des facteurs édaphiques dans la répartition spatiale de quelques rongeurs au Sénégal. *MAMMALIA*, 41, (1) : 35-59, 4 tabl., 8 fig., 39 réf.
- HUDSON (N.W.), 1973. Soil conservation. BATSFORD edit., London, 320p.
- INFORMATIQUE ET BIOSPHERE (Association), 1971. Glossaire de Pédologie. Description de l'environnement en vue du traitement informatique. Paris, 173p.
- IRIS (J.M.), 1985. Cartographie des organisations superficielles du bassin versant d'Agassaghass. République du Niger - ORSTOM, Adiopodoumé, 12 p., 1 fig., 2 tabl., 6 réf.
- JAILLARD (B.), CABIDOUCHE (Y.M.), 1984. Etude de la dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant. *Dynamique hydrique. Sc. du sol*, 1984 (3) : 239-250, 7 fig., 11 réf.
- JANEAU (J.L.), 1985. Cartographie des états de surface du bassin de l'Hindenwou (Nord Togo). ORSTOM, Abidjan, 12p., multigr., + 1 carte h.t. à 1/30.000e.
- JANEAU (J.L.), 1986. Esquisse à 1/50.000 des états de surface du bassin versant de Nadjoundi (Nord Togo). ORSTOM, Abidjan, 10p., multigr., + 1 carte h.t. à 1/50.000e.
- JANEAU (J.L.), BOUVIER (C.), 1987. La simulation de pluie et les états de surface en milieu urbain. ORSTOM, Abidjan, 20p., multigr., 3 tabl., 6 fig., 8 réf., + annexes.
- JANEAU (J.L.), VALENTIN (C.), 1987. Relations entre les nids de Trinervitermes et la surface du sol : réorganisations, ruissellement et érosion. *Revue d'Ecol. et Biol. des Sols*, 24 (4) : 637-647, 4 tabl., 3 fig., 14 réf.
- JOHNSON (C.B.), MANNERING (J.V.), MOLDENHAUER (W.C.), 1979. Influence of surface roughness and clode size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 43 : 772-777.
- JOLY (F.), DEWOLF (Y.), RIOU (G.), 1980. Le bassin de la mare d'Oursi (Haute-Volta). Etude géomorphologique et géodynamique. Contraintes naturelles. Univ. Paris VII. Laboratoire de Géographie Physique, Travaux, n° 7, 65p., 28 photos, 4 cartes h.t.
- KELLER (J.), 1967. Sprinkler intensity and soil tilth. *Trans. ASAE*, 13, 118-125.
- KEMPER (W.D.), EVANS (D.D.), HOUGH (H.W.), 1974. Crust strength and cracking : I. Strength - in : CARY (J.W.), EVANS (D.D.) édit, *Soil Crusts - Agricult. Exp. station, Univ. of Arizona, Tucson*, Techn. bull. 214 : pp. 31-38.
- KEMPER (W.D.), NOONAN (L.), 1970. Runoff as affected by salt treatments and texture. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 34 : 126-130.

- KHEYRABI (D.), 1966. Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale. Thèse Docteur-Ingénieur, Paris, 123 p.
- KHEYRABI (D.), MONNIER (G.), 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.* 19 (2) : 129-152.
- KOOISTRA (M.J.), SIDERIUS (W.), 1986. Micromorphological aspects of crust formation in a savanna climate under rainfed subsistence agriculture. in : Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOOOT (M.) ed. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp.9-17, 1 fig., 10 réf.
- KOWAL (J.M.), KASSAM (A.H.), 1976. Energy load and instantaneous intensity of rainstorms at Samaru, Northern Nigeria. *Trop. Agric.* 53 (3) : 185-197p., 5 tabl., 3 fig., 11 réf.
- LAFFORGUE (A.), 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, ser. Hydrol.*, XIV, 4, pp. 299-344.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIII, 3, pp 195-237.
- LAFFORGUE (A.), CASENAVE (A.), 1980. Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. *La Houille Blanche*, n° 4-5, pp 243-249.
- LAL (G.), 1976. Soil erosion problems on alfisols in Western Nigeria and their control. IITA Monograph, 401, IBADAN, 153p. + annexes.
- LANUEC (J.P.), 1980. Le parc d'un village mossi (zaongho). Du traditionnel au moderne. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum.*, 17 (3-4) : 151-154, 3 fig.
- LAVELLE (P.), 1983. The soil fauna of tropical savannas. II. The Earthworms - in : Tropical Savannas. BOURLIERE (F.) édité., ELSEVIER, Amsterdam, pp. 485-504, 7 tabl., 11 fig., 33 réf.
- LAWS (J.O.), 1949. Measurement of fall velocity of water drops and raindrops. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 709-721.
- LAWS (J.O.), PARSON (D.A.), 1943. The relation of rain drop size to intensity. *Trans: Amer. Geophys. Union* 24 : 452-459.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1985. Etude expérimentale de l'influence des conditionneurs de sol sur la microorganisation et les propriétés physiques des argiles et des sols. D.E.A., Univ. ORLEANS, 113p.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1987. Etude des mécanismes de mobilisation et de redistribution des particules sous l'action des pluies à la surface du sol. INRA, Orléans, doc. de travail, 11p. + annexes.
- LE BRUSQ (J.Y.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.), CARN (M.), 1987. Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer, et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Sci. du sol*, 25 (3) : 173-184, 1 tabl., 3 fig., 7 réf., + annexes.
- LE HOUEROU (H.N.), 1979. Ecologie et désertisation en Afrique. *Trav. de l'Institut de Géographie de Reims*, n° 39-40 : 5-26.
- LE MOS (P.), LUTZ (J.F.), 1957. Soil crusting and some factors affecting it. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 21 : 485-491, 33 réf.
- LEPAGE (M.), 1974. Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : Influence de la sécheresse sur le peuplement en termites. *LA TERRE et la VIE* ; 28 (1) : 76-94, 9 tabl., 3 fig., 25 réf.
- LEPAGE (M.), MOREL (G.), RESPLENDINO (Cl.), 1974. Découverte de galeries de termites atteignant la nappe phréatique profonde dans le nord du Sénégal. *C.R. Acad. Sci. (Paris), sér. D, T. 278*, 14, pp. 1855-1858.
- LEPRUN (J.C.), 1971. Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal). *Ass. Sénégal. et Quatern. Ouest Afric., Bull. Liaison, Sénégal*, n° 31, 69-78, 2 fig., 10 réf.
- LEPRUN (J.C.), 1976. Une construction originale hypogée pour le stockage de l'eau par les termites en régions sahélo-soudaniennes de Haute-Volta. *Pédobiologia*. 16 (6) : 451-456.
- LEPRUN (J.C.), 1978. Compte rendu de fin d'études 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*, 45 p. multigr., 8 tabl., 13 fig., 6 photo., 34 réf.
- LEPRUN (J.C.), 1979. Etude de l'évolution d'un système d'exploitation sahélien au Mali. Volet pédologique. Rapport de campagne 1979. *ORSTOM/DGRST, Paris*, 27 p. multigr., 7 fig., 18 photo., 9 réf.
- LEPRUN (J.C.), 1983. Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do sols no Nordeste Brasileiro (1982-1983). *SUDENE/ORSTOM, Recife*, 290p., multigr.
- LEPRUN (J.C.), SILVEIRA (C.O. da), SOBRAL FILHO (R.M.), 1986. Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 22 (2) : 223-233, 11 tabl., 1 fig., 17 réf.
- LOINTIER (M.), PIEYNS (S.), 1981. Télédétection n° 4. Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupation du sol par télédétection. Initiation et documents techniques n° 47, *ORSTOM, Paris*.

- LOINTIER (M.), LORTIC (B.), 1984. Mare d'Oursi (Haute-Volta). Traitement numérique de la vue LANDSAT du 4 février 1976. ORSTOM, Cayenne, 13p., multigr.
- LORTIC (B.), 1982. Création de nouveaux canaux par méthode photographique. Actes du Symposium intern. de la Commission VII de la SIPT (Toulouse, sept. 1982).
- MAHOP (F.), 1983. Effets de différents types d'apport d'eau sur un sol peu évolué d'apport colluvial hydro-morphe. Première utilisation d'un ruisselleur, N'Dorola (Haute-Volta). ORSTOM, Abidjan, 21p., multigr., + annexes.
- MAIGNIEN (R.), 1969. Manuel de prospection pédologique. ORSTOM, Collection Initiat. Doc. Techniques n°11, 132p.
- MAIGNIEN (R.), 1980. Manuel pour la description des sols sur le terrain. ORSTOM, Paris, 112p. + annexes.
- MAINGUET (M.), CANON-COSSUS (L.), CHEMIN (M.C.), 1979. Dégradation dans les régions centrales de la République du Niger : degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme. Trav. de l'Institut de Géographie de Reims, 4039-40 : 61-73, 2 tabl., 1 fig.
- MANICHON (H.), 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 214 p. multigr., 154 réf. + annexes
- MARCHAL (J.Y.), 1979. L'espace des techniciens et celui des paysans. Histoire d'un périmètre antiérosif en Haute-Volta. in : Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale, CNRST-ORSTOM, Mém. ORSTOM n° 89 : 245-252, 1 tabl.
- MARCHAL (J.Y.), 1980. Arbres et brousses du paysage soudano-sahélien. Dynamique des formations végétales au nord de la Haute-Volta. Cah. ORSTOM, Sér.Scienc. Hum., 17 (3-4) : 137-149, 1 tabl., 2 fig., 7 photos, 15 réf.
- MARCHAL (J.Y.), 1983. La dynamique d'un espace soudano-sahélien (Yatenga Nord Haute-volta). thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Paris I, ORSTOM, Coll. Trav. et Doc. n° 167, 873p.
- MARCHAL (J.Y.), 1986. Vingt ans de lutte anti-érosive au Nord du Burkina-Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 22 (2) : 173-180, 21 réf.
- MARTIN (D.), 1960. Problèmes d'utilisation des sols au Nord-Cameroun. IBCAM, Yaoundé, n° 117, doc. multigr.
- MARTINELLI (B.), SERPANTIE (G.), 1987. Deux points de vue sur la confrontation des paysans aux aménageurs dans le Yatenga (Burkina-Faso). ORSTOM, Ouagadougou, 51p., multigr., 11 fig., 20 réf.
- Mc INTYRE (D.S.), 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci., 85 : 185-189.
- MENAUT (J.C.), BARBAULT (R.), LAVELLE (P.), LEPAGE (M.), 1985. African savannas : biological systems of humification and mineralization - in : TOTHILL (J.C.), MOTT (J.J.) édit., Ecology and Management of the World's savannas, Australian Acad. Science. Canberra, pp. 14-33.
- MIETTON (M.), 1981. Lutte anti-érosive et participation paysanne en Haute-Volta. Géo. Eco. Trop. 5 (1) : 57-72, 4 fig., 7 réf.
- MIETTON (M.), 1986. Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina-Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 22 (2) : 181-196, 7 fig., 31 réf.
- MILLEVILLE (P.), 1982. Etude d'un système de production agro-pastoral sahélien de Haute-Volta. 1ère partie : Le système de culture. A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. ORSTOM/DGRST, Ouagadougou, multigr., 66p., 8 fig., 3 tabl., 16 réf.
- MILLEVILLE (P.), COMBES (J.), MARCHAL (J.), 1982. Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan. Etude de cas. ORSTOM, Ouagadougou, 126p., multigr., 18 fig., 20 réf.
- MONNIER (G.), 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris, 140p.
- MONNIER (G.), 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. 16 : 327-400 ; 471-534.
- MONNIER (G.), 1985. Recherches sur la stabilité structurale. Exemples d'applications. in : Livre jubilaire du cinquantenaire. A.F.E.S., Paris, pp. 293-297.
- MONNIER (G.), BOIFFIN (J.), PAPY (F.), 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 12 (2) : 123-131.
- MONNIER (G.), KONAN (L.), 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron. 19 (5), 541-551.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), 1982. La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bull. Tech. Info. n° 370-372, p. 503-512.
- MOUGENOT (B.), 1983. Caractérisation et évolution des états de surface en relation avec la dynamique des sels dans le delta du Sénégal. Méthodologie et résultats partiels de la campagne 1982-1983. ORSTOM Dakar, 50p., 16 fig., 17 réf.
- MÜCHER (H.J.), DE PLOEY (J.), 1977. Experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. Earth Surface Processes, 2 : 117-124, 3 fig., 21 réf.

- ORSTOM, 1969. Glossaire de Pédologie. Description des horizons en vue du traitement informatique. ORSTOM, Paris, 82p.
- ORSTOM Télédétection, 1978. Télédétection n°2. Analyse multivariable. Procédure LOTERIE. Application à l'analyse multispectrale en télédétection. Initiation et documents techniques n° 35. ORSTOM, Paris.
- PAGE (E.R.), 1979. The effect of poly(vinylalcohol) on the crust strength of silty soils. *The J. of Soil Sci.*, 30 (4) : 643-651, 23 réf.
- PEDRO (G.), KILIAN (J.), PIERI (C.), MOREAU (R.), DUBREUIL (P.), LE GOUPIL (J.C.) et ELDIN (M.), 1987. Sols et eaux. Acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. ORSTOM/Banque Mondiale, 184p.
- PELLISSIER (P.), 1984. Questions sur le Sahel. *Bull. Soc. Languedocienne de Géographie*. 18 (3-4) : 117-124.
- PIAS (J.), 1970a. Carte pédologique du Tchad à 1/1.000.000. ORSTOM, Paris, Collection Notice explicative n° 41, 167p., 14 fig., 223 réf.
- PIAS (J.), 1970b. La végétation du Tchad. Ses rapports avec les sols. Variations paléobotaniques au quaternaire. ORSTOM, Paris, Coll. Trav. et Doc. n° 6, 47p., + 1 carte h.t.
- PLANCHON (O.), 1985. Utilisation d'un simulateur de ruissellement pour l'étude expérimentale de l'érosion. ORSTOM, Abidjan, 16p., multigr.
- POESEN (J.), 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian flow volume. *Z. Géomorph. N.F.* 49 : 117-131.
- POESEN (J.), 1986. Surface sealing on loose sediments : the role of texture, slope and position of stones in the top layer - in : Assessment of soil surface sealing and crusting. CALLEBAUT(F.), GABRIELS (D.), DE BOODT (M.) édit. Flanders Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 354-362, 2 tabl., 4 fig., 14 réf.
- PONCET (Y.), 1986. Images spatiales et paysages sahéliens. Une étude régionale des milieux naturels par télédétection. Azawagh, République du Niger. ORSTOM, Coll. Travaux et Documents, n°200, 255 p, 1 carte h.t.
- PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEYNI-BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1986. Apport de l'infiltromètre à aspersion pour l'évaluation des ressources en sol des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Col. Colloques et Séminaires, pp 165-189.
- 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, pp 341-360.
- POUPON (H.), 1980. Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. ORSTOM, Paris, coll. Trav. et Doc., n° 115; 351p.
- QUANTIN (P.), COMBEAU (A.), 1962. Relation entre érosion et stabilité structurale. *C.R. Acad. Sci.*, 254 : 1855-1857.
- RADWANSKY (S.A.), 1968. Field observations of some physical properties in colluvial soils of arid and semi-arid regions. *Soil Sci.* (106) 4 : 314-316, 6 réf.
- RIETVELD (J.J.), 1978. Soil non wettability and its relevance as a contributing factor to surface runoff on sandy dune soils in Mali. *Projet : Production Primaire au Sahel*, Wageningen, 179p., multigr.
- ROBERT (F.J.), CARBON (B.A.), 1972. Water repellence in sandy soils of south-western Australia. *Aust. J. Soil. Res.*, 10 : 35-42, 6 tabl., 22 réf.
- ROBERT (M.), VENEAU (G.), HERVIO (M.), 1983. Rôle des composés amorphes du fer et de l'aluminium sur quelques propriétés des argiles. Influence du degré d'hydroxylation du cation. *Science du Sol*, 3-4, 235-250.
- RODIER (J.A.), 1984-1985. Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 21 (2).
- ROOSE (E.), 1985. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. ORSTOM, Paris, Collection Travaux et Documents, n° 130, 569p. Thèse d'Etat, Orléans, 1980.
- ROSE (C.W.), 1961. Rainfall and soil structure. *Soil Sci.* 91 (1) : 49-54, 4 tabl., 3 fig., 10 réf.
- RUIZ FIGUEROA (J.F.), VALENTIN (C.), 1983. Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall. ORSTOM, Abidjan, 17p., multigr., 4 tabl., 2 fig., 19 réf.
- SARLIN (P.), 1965. La végétation du secteur de Ouahigouya. Division des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols/GERES, Ouagadougou, 32p., multigr.
- SAVADOGO (N.A.), 1987. Localisation des eaux souterraines par l'étude des indices biologiques dans les régions cristallines du Burkina-Faso. Atelier International sur la gestion de l'eau et des ressources naturelles pour intensifier la production agricole en Afrique. FIS/Univ. Niamey, 9-14 mars 1987, Niamey, 22p.
- SEBILLOTTE (M.), 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. Agron.* 19 (4) : 403-414.

- SEGUIS (L.), 1986. Recherche, pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame écoulée) et sa régionalisation. Thèse USTL, Montpellier, 326 p., multigr.
- SERPANTIE (G.), 1985. L'élevage dans les systèmes agropastoraux sahélo-soudaniens et soudano-sahéliens du Burkina. Problématique de changement technique. Atelier sur les Technologies appropriées par les paysans des zones semi-arides d'Afrique Occidentale. F.U.S. SAFGRAD, Ouagadougou, 11p., multigr., 3 annexes, 17 réf.
- SERPANTIE (G.), MERSADIER (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.), 1985. La dynamique des rapports agriculture-élevage en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso : diminution des ressources, organisation collective et stratégies d'éleveurs paysans au Nord du Yatenga. 2^e Séminaire CIRAD-DSA "Relations agriculture-élevage", 10-13 septembre 1985, Montpellier, 16p., multigr., 5 fig. 7 réf.
- SERPANTIE (G.), VALENTIN (C.), 1985. Dynamique du milieu physique de la zone agro-pastorale de Bidi (Yatenga - Burkina-Faso). ORSTOM, Ouagadougou, 11p., multigr., 2 cartes h.t., 1 fig., h.t.
- SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.), VALENTIN (C.), 1988. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral subsahélien sous aridification : conséquences pour les systèmes de production. ORSTOM, Ouagadougou, multigr., 29 p.
- SHAINBERG (I.), 1985. The effect of exchangeable sodium and electrolyte concentration on crust formation. *Advances in Soil Science*, I, pp. 101-122, 1 tabl., 10 fig., 38 réf.
- SHARMA (D.P.), AGRAWAL (R.P.), 1980. Physico-chemical properties of soil crust and their relationships with the modulus of rupture in alluvial soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 28 (1) : 119-121, 2 tabl., 9 réf.
- SIGALA (F.), 1987. Etude de l'influence du sodium, apporté par une irrigation estivale, sur l'évolution de la couche superficielle d'un sol argileux sous l'effet de la pluie. Thèse, Univ. Avignon. 74p., multigr., + annexes.
- SIRCOULON (J.), 1976. Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIII, 2, pp 75-174.
- SIRCOULON (J.), 1984-85. La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-84 avec les années 1972-1973. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XXI, 4, pp 75-86.
- SOMBROEK (W.G.), ZONNEVELD (I.S.), 1971. Ancient dune fields and fluvial deposits in the Rima-Sokoto river Basin (N.W. Nigeria). Geomorphic phenomena in relation to quaternary changes in climate at the southern edge of the Sahara. Soil Survey Institute, Wageningen, Pays-Bas, Soil survey pages n° 5, 109p.
- STENGEL (P.), 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation des sols in situ. *Ann. Agron.* 30 (1) : 27-51.
- TESSIER (D.), 1978. Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation. *Ann. Agron.* 29 (4) : 319-355.
- TESSIER (D.), 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doctorat d'Etat. Univ. Paris VII, 361p.
- TESSIER (D.), PEDRO (G.), 1984. Recherches sur le rôle des matériaux argileux dans l'organisation et le comportement des sols. AFES, Paris, Livre Jubilaire du Cinquantenaire, pp. 223-234.
- THEBE (B.), 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse Docteur Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 306 p., multigr.
- TIXIER (J.), 1958. Etudes d'écoulements en régime sahélien. Massif de l'Ouaddaï. Bassin expérimental de l'Ouadi Kaoun. Campagne 1956-57. ORSTOM Paris, 77p., multigr.
- TIXIER (J.), BESLON (M.), 1961. Bassin expérimental d'Abou-Goulem. Campagne 1958-59. ORSTOM, Fort-Lamy, 66p., 35 fig., multigr.
- TOUTAIN (B.), 1979. Situation de l'élevage dans le sahel voltaïque face à l'extension de l'espace agricole. in : Maîtrise de l'espace agricole et développement en Afrique tropicale. Logique paysanne et rationalité technique. *Mém. ORSTOM n° 89*, 159-162, 2 tabl.
- UNESCO, 1971. Tectonique de l'Afrique. UNESCO Ed., Paris, 602 p. + cartes.
- U.S.D.A., 1975. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Handbook n° 436, Washington, 754p.
- VALENTIN (C.), 1978. Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques et interprétations agronomiques. ORSTOM, Adiopodoumé, 141p., multigr., 39 tabl., 85 fig., 111 réf.
- VALENTIN (C.), 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau : Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII, Etudes et Thèses, ORSTOM, 1985, 259 p.
- VALENTIN (C.), 1981b. Esquisse au 1/25.000^eme des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi, Nord Haute- Volta). ORSTOM, Abidjan, 11p.

- VALENTIN (C.), 1981c. Systèmes de production au Sénégal. Evolution de la surface du sol. Piétinement, érosions hydrique et éolienne (1ère campagne). ORSTOM, Abidjan, 29p., multigr., 3 tabl., 7 fig., 32 réf.
- VALENTIN (C.), 1984. L'énergie cinétique des pluies à Abidjan (Côte d'Ivoire). document inédit.
- VALENTIN (C.), 1985a. Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the Sahelian Zone. in : "Soil Erosion and Conservation" Soil Conservation Society of America (edit.) : 51-65.
- VALENTIN (C.), 1985b. Le bassin versant de Boulsa-Koghneré (Burkina Faso). Organisations superficielles. Interprétation des photographies aériennes de 1956 et de 1980. ORSTOM, Adiopodoumé, 19p., 3 fig., 7 tabl., 4 réf., 4 pl. photos.
- VALENTIN (C.), 1986. Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp 50-74.
- VALENTIN (C.), 1986b. Surface crusting of arid sandy soils. in : Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOOOT (M.) ed. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 9-17, 1 fig., 10 réf., pp. 40-47, 2 tabl., 4 fig., 9 réf.
- VALENTIN (C.), 1986c. Effects of soil moisture and kinetic energy on the mechanical resistance of surface crusts. in : Assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985. CALLEBAUT (F.), GABRIELS (D.), DE BOOOT (M.) ed. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, pp. 367-369, 2 fig., 2 réf.
- VALENTIN (C.), 1986d. Carte des états de surface des bassins de Gagara, Burkina Faso.
- VALENTIN (C.), FRITSCH (E.), PLANCHON (O.), 1987. Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane. L'exemple d'un bassin versant du nord-ouest de la Côte d'Ivoire. in : Land Development Management of acid soils. IBSRAM Proc. n° 4, Bangkok, pp. 67-81, 5 fig., 21 réf.
- VALENTIN (C.), RUIZ FIGUEROA (J.F.), 1987. Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation, in : Micromorphologie des sols, AISS/AFES, Paris : pp. 401-408, 5 tabl., 4 fig., 14 réf.
- VIZIER (J.F.), 1984. Les phénomènes d'hydromorphie en régions tropicales à saisons contrastées. Application à une meilleure caractérisation des concepts de gley et de pseudogley. Sc. du sol, 1984 (3) : 225-238, 2 tabl., 2 fig., 18 réf.
- WARREN (A.), MAIZELS (J.K.), 1977. Ecological change and desertification. in : Desertification : its causes and consequences. Secretariat of the United Nations Conference on Desertification. Nairobi, Kenya, 29 août-9 septembre 1977, Pergamon Press, Oxford.
- WHITE (F.), 1986. La végétation de l'Afrique. ORSTOM/UNESCO, Paris, Recherches sur les ressources naturelles XX. pp. 223-236.
- WIERSUM (K.F.), 1985. Effects of various vegetation layers in an *Acacia auriculiformis* forest plantation on surface erosion in Java, Indonesia - in : Soil Erosion and Conservation. SWAIFY (S.A.) MOLDENHAUER (W.C), LO (A.) edit., Soil Cons. Soc. of America, pp. 79-89, 3 tabl., 1 fig., 16 réf.
- WISCHMEIER (W.H.), 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. Proc. 1st Pan American Soil Cons. Congr. Sao Paulo, Brazil : 237-244.
- WISCHMEIER (W.H.), 1974. New developments in estimating water erosion. Proceedings of the 29th annual meeting of the soil cons. Soc. of Amer., New York : 179-186.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Amer. Geophys. Union 39 (2) : 285-291, 2 tabl., 4 fig., 13 réf.
- WISPELAERE (G. de), 1980. Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais. Influence de la proximité d'un forage. Cah. ORSTOM, sér. Scienc. Hum., 17 (3-4) : 155-166, 2 tabl., 4 fig., 8 photos, 12 réf. + annexes.
- YODER (R.E.), 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. J. Am. Soc. Agron., 28 : 337-351.
- ZONNEVELD (I.S.), DE LEEUW (P.N.), SOMBROEK (W.G.), 1971. An ecological interpretation of aerial photographs in a savanna region in northern Nigeria. I.T.C. Enschede, Pays-Bas, Sci. B., n° 3, 41p., 3 fig., 1 carte, 10 photo., 21 réf.

INDEX

A

Acacia albida 88, 160, 184
Acacia ehrenbergiana 184
Acacia laeta 184
Acacia nilotica 160
Acacia raddiana 160, 164, 184
Acacia senegal 164, 184
Acacia seyal 166
Acacia sieberiana 184
Activité faunique 96, 126, 151, 160, 284,
cf Fourmis, Vers de terre et Termites
Adansonia digitata 162
Adrar des Iforas 44
Adrar mauritanien 44
Adventices 60, 186
Affleurements de roches 100, 125
Agadez 140
Agassahas 44
Agents anticroustants 184
Agora 160
Agressivité des pluies 81, 84
Agrostologie 56
Agrumes 162
Algues 78, 102, 164, 172
Alizés 36
Alluvions 162 :
□ argileuses 168
□ sableuses 168
Aluminium 77
Andropogon gayanus 56, 56, 162
Ansouri 162
Arachide 88, 162
Arènes granitiques 125, 164
Argiles 102 :
□ cf Dispersion
□ chlorite 184
□ gonflantes 65, 68, 77
□ kaolinite 50, 77
□ minéralogie 87
□ montmorillonite 50, 77
□ smectites 65, 77
Aristida mutabilis 56, 164
Association des cultures 88
ATTERBERG (limites d') 65, 68

B

BAGNOLD (diagramme de) 70
Balanites aegyptiaca 168
Bandes d'arrêt 88
Banigorou 44
Baobab 162
Bas-fond 166, 186
Bellicositermes bellicosus 58
Bénin 14
Besoins en eau des cultures 142
Bidi 160
Billonnage 60
Billonnage cloisonné 60
Blocs 102
Bois galerie 160
Bombax costatum 162
Borassus aethiopum 162
Botanique 56
Boulant 104, 108
Boulsa 178
Bourgou 162
Bourgoutière 160
Bowal 164
Bowé 58, 164
Brise-vent 86, 184, 184
Brousse tachetée 160, 176
Brousse tigrée 158
Burkina Faso 11, 14, 40, 44, 47, 68, 77, 80, 140, 148,
154, 155, 160, 162, 168, 178, 184
Bush 150
Buttage 60
Butyrospermum parkii 162

C

Caïlcedrat 184
Cailloux 102
Calcaire 102; 116
Calcium 77
Calibre minimum, Dmin 80
Calotropis procera 164
Cameroun 14, 39, 47, 140, 168
Canaux radiométriques 155
Carbonates 77

Cartes d'états de surface 178
Cenchrus biflorus 56, 164
 Chanfrein 166
 Charge grossière 102, 126, 138
 Charge pastorale 172, 174
 Chlorite 184
 Chlorures 116
 Choix des sites expérimentaux 152
Citrus aurantifolia 162
Citrus limon 162
 Clef de détermination :
 □ des principaux types de croûtes superficielles 110
 □ des types de surface élémentaire 127
 Climat 35
 Code Munsell 100
 Coefficient d'infiltration 30
 Coefficient de ruissellement 142
 Cohésion 70, 108
 Collines de roches vertes 120, 164
 Colluvion 164
Commiphora africana 164
 Composés métalliques 184
 Composition des eaux d'irrigation 84
 Composition floristique 56
 Conakry 37
 Conditionneurs 184
 Congo 11, 37
 Conséquences de la modification des états de surface
 sur le ruissellement 178
 Continental Terminal 44
 Continuité 100
 Corrasion 70
 Côte d'Ivoire 11, 14, 37, 68, 140
 Cotonnier 168
 Couleur d'un horizon 100
 Coupe de bois 172
 Couvert végétal 94, 127, 150 :
 □ arboré 150, 184
 □ herbacé 56, 94, 150, 170, 182
 Couverture du sol 86
 Couverture pédologique 47
 Cram-cram 56, 164
 Croûtes 96 :
 □ à charge grossière (G) 114
 □ structurale 72, 80, 110, 112
 - à 1 microhorizon (ST1) 118
 - sableuse à 2 microhorizons (ST2) 110
 - sableuse à 3 microhorizons (ST3) 112
 □ d'érosion (ERO) 58, 72, 138
 □ de battance 66
 □ de décantation (DEC) 74, 86, 116, 136
 □ de dépôts éoliens (EOL) 74, 112, 116, 166, 172
 □ de dessiccation (DES) 74, 84, 110, 116

 □ de ruissellement (RUIS) 72, 84, 114
Cubitermes 58
 Cuirasses ferrugineuses 50, 125, 172
 Culture en planches 168
 Cultures maraîchères 162
 Cures salées 168
 Cuvette tchadienne 168
 Cyanophycées psammophiles 164

D

Daba 60
 Débris coquilliers 116
 Déflation 172
 Déflation 70, 74
 Défrichements 50, 162
 Degré d'hydromorphie 125
 Degré d'obstruction 150, 157
 Dépôts :
 □ de décantation 68
 □ de ruissellement 68
 □ éoliens 116
 Dépressions 56 :
 □ du Bahr el Ghazal 168
 □ interdunaires 166
 □ périphérique 49
 Désertification 186
 Dessiccation 68, 84
 Diagramme de BAGNOLD 70
 Diagramme de HJULSTRÖM 66
 Diguettes 166
 Dispersion des argiles 65, 66, 76, 77, 84
 Dos de baleine 162
 Dunes :
 □ fixées 50, 170, 172
 □ vives 50, 125, 164, 172
 □ récentes 164
 Dureté 70, 77

E

Echelle d'étude 93
Echinochloa stagnina 162
 Eclatement 65, 76, 77, 84
 Effervescence à l'acide 102, 116
 Efficience pédologique 148
 Efflorescences salines 48, 77, 102, 116, 168
 Éléments grossiers 76, 114, 138
 Éléments modulateurs 127
 Eluviation 46
 Emulsions bitumineuses 184
 Endoréisme 116
 Énergie cinétique des pluies 24, 66, 82, 84, 86

Enfouissement :
 □ de paille 77
 □ des résidus de récolte 90
 Engrais verts 77
 Epaisseur de la lame d'eau 66
 Erosion 151 :
 □ éolienne 164, 184
 □ hydroéolienne 164 166
 □ linéaire 172
 Erosivité 81
 Espèces annuelles 56
 Espèces pérennes 56
 Estimation visuelle du pourcentage de recouvrement 94
 Etat de surface 14, 93, 158
 Etat hydrique initial 84
 Etat structural initial 88
Eucalyptus camaldulensis 184
Euphorbia balsamifera 164
 Evaporation 77
 Evapotranspiration 142
 Evolutions saisonnières 116
 Extension des zones cultivées 178

F

Fabacée 56
 Fentes 68, 104
 Fer 77, 100
 Ferlo 170, 172 :
 □ cuirassé 160, 164
 □ sableux 166, 172
 Feux de brousse 182 184
 Fiche des relevés minimaux 120
 Fissuration 65, 68, 76, 78, 84
 FIT 37
 Fonction de production 156
 Forage 172
 FOREST (modèle de) 142
 Fourmis 58
 Fragilité 108
 Fumier 77
 Fumure organique 172, 184

G

Gabbro 164
 Gagara 154, 156
 Galerie forestière 160
 Galmi 44
 Garniture ionique 76, 77
 Géomorphologie 49, 78
 Gilgai 47, 118, 150
 Glacis tropicaux 50, 166

Gley 49, 125
 Glossaires 94, 98
 Gonflement 65
 Gourma malien 160, 168, 172
 Goyavier 162
 Graminées 56
 Granites 44, 162 :
 □ calco-alcalins 168
 □ en boules 162
 Granulométrie 86,
 cf Texture et Tri granulométrique
 Graviers 102
 Gravillons 102 :
 □ enchâssés dans une croûte 138
 □ libres 138
 Grès 44, 162
 Guyane 14
 Gypse 77, 184

H

Haies 184, cf Brise-Vent
 Hardé 166
 Harmattan 36, 38
 Histoire hydrique du sol 84
 HJULSTRÖM (diagramme de) 66
 Horizons :
 □ A 46
 □ B 46, 164, 166, 172
 □ C 46
 □ E 46
 □ R 46
 Humectation 65, 84
 Hydromorphie 125
 Hydrophobie 77, 84
 Hyétogramme 40

I

Idenwou 140
 Illuviation 50
 Images satellitaires 155, 158
 Impluvium 164
 Inclinaison de la pente 78
 Indice :
 □ de satisfaction des besoins en eau 142, 143
 □ pluviométrique 26
 Induration des croûtes 84
 Infiltration 126
 Infiltromètre à double anneau (MÜNTZ) 14
 Inselbergs 162
 Instabilité structurale 76
 Intensité limite de ruissellement 31, 126

Interbillons 116
 Interception 86, 162
 Irrigation 186 :
 □ gravitaire 84
 □ par aspersion 66, 84
 □ composition de eaux 84
 Isohyètes 38, 40
 Isohypses 96, 151

J

Jachère 88, 126 164, 178 :
 □ durée 77
 Jardins 162, 168
 Jujubier 184
 Jupes sableuses 164

K

Kaolinite 50, 77
 Kapokier 162
 Karité 162
 Kazanga 178
Khaya senegalensis 184
 Kognere 152, 178
 Kolel 162
 Koumbaka 162
 Kountkouzout 44, 143, 162, 182

L

Labour 88
 Lac :
 □ Faguibine 168
 □ Fitri 168
 □ Horo 168
 □ Tchad 168
 Lames minces 98
Lannea humilis 166
Leptadenia Pyrotechnica 166
 Levée des semences 68, 70
 Lichens 102
 Limite :
 □ de liquidité 65
 □ de retrait 68
 Limon 102
 Liptako 160
 Liquéfaction 77
 Liquidité (limite de) 65
 Lissage 88
 Lit de semences 88
 Lithosols 47, 118
 Litière 86, 162

Loi de POISEUILLE 104
 Loi de STOKES 68
Loudetia togoensis 162, 164

M

Macroporosité 104
Macrotermes 58
 Madagascar 14
 Magnésium 77, 116, 168
 Maïs 168
 Mali 44, 80, 85, 160, 162, 168, 172, 184
 Manga 178
Mangifera indica 162
 Manguier 162
 Maraîchage 168
 Marais 162
 Marécage 164
 Mares 164, 172 :
 □ mares temporaires 166
 Matière organique 76, 77, 84, 100, 116
 Mauritanie 44, 80, 85, 158, 164, 168
 Mésosofaune 86, cf Activité faunique
 Mésorelief 96, 150
 Microhorizons 96 :
 □ de référence 108
 □ sableux 110
 □ plasmique 110
 Micromorphologie 98
 Microorganisations pelliculaires superficielles 96
 Microporosité 104
 Microprofil 96
 Microrelief 96, 127, 150, 174
 Microrides d'éolisation 116
 Mil 162, 164
 Milieux cuirassés 164
 Milieux sableux 164
 Minéralogie des argiles 77
 Minisimulateur de pluie 14 :
 □ fiabilité et la fidélité 32
 □ description de l'appareil 23
 Mis en défens 184
 Modèle :
 □ "simulateur" 182, (validation du) 140
 □ à discrétisation spatiale 155
 □ BIP 142
 □ de FOREST 142
 Modélisation 156
 Montmorillonite 50, 77
 Mops 96
 Mouda 140, 164
 Mouillabilité 76, 77
 Mousses 102

Mulch 104, 150
MÜNTZ (infiltromètre à double anneau) 14, 16

N

Nadjoundi 140
Naga 166
Nanorelief 96
Nappe 160
Natron 168
N'Djamena 38
Néré 162
Netteté de la transition 100
Niamey 38
Niger 14, 44, 47, 80, 140, 143, 160, 164, 168, 184 :

- central 47
- méridional 47
- occidental 44, 47
- oriental 47

Nigéria (nord du) 44, 164
Niono 168
Nord-Cameroun 32, 47, 140, 164, 166, 186,
cf Cameroun

O

O.N.G. 184
Ombre des arbres 56, 162
Origine éolienne 164
Ouadi 168
Ouagadougou 152
Oudalan 172
Oursi 140, 155, 164

P

Paillage 86, 90, 98, 150
Pakinsonia aculeata 184
Panicum laetum 56
Panicum turgidum 160
Para-rendzines 116
Parcours des régions cuirassées 172
Parcours des régions sableuses 172
Parcs à *Acacia albida* 162
Pare-feux 184
Parkia biglobosa 162
Pâturages 56, 164
Pays mossi 152, 160, 178, 184
Pédoclimat 50, 56
Pellicule plasmique : 138, 172, 184
Pénétrromètres 108
Pennisetum pedicellatum 56, 182
Pente (inclinaison) 78

Phase d'imbibition 29
Phase de vidange 30
Phosphogypse 184
Photo-interprétation 152
Photographies aériennes 49, 58, 147, 148, 152, 160, 162, 178
Piémonts 164
Pierres 102
Piétinement du bétail 164, 172
Piliostigma reticulatum 168
Placages de récolte de termites 58, 96, 126, 132
Plaines alluviales 168
Plaquettes (structure en) 104
Plasma 102
Plateaux cuirassés 58

- endoréiques 164

Pluie :

- annuelle 38
- au sol 40
- d'imbibition 30, 126, 142
- des mangues 39
- journalière de fréquence rare 80

Pluviométrie 38 :

- à 1 mètre 40
- journalière 40

Poacée 56
Point d'entrée d'air 68
POISEUILLE (loi de) 104
Polycations métalliques 186
Polygénie 100, 110, 114
Polysaccharides 184
Polyvinylalcohol 184
Pomme de Sodome 164
Poquets 186
Porosité 104 :

- macroporosité 104
- microporosité 104
- fonctionnelle 104
- non fonctionnelle 106
- temporairement fonctionnelle 104
- vésiculaire 72, 106, 126
- vésiculaire des solonetz 48

Pourcentage de recouvrement 94
Prairies 56 :

- marécageuses 160

Précipitations exceptionnelles 80
Préparations superficielles 88
Prismatique (structure) 104
Procédure LOTERIE 155
Profil cultural 118, 174
Profil pédologique 46
Pseudogley 49, 125
Psidium goyava 162

Pterocarpus lucens 164

PVA 184

R

Recouvrement 148 :

- global 148
- par strate 148
- total 94, 148

Reg 93, 164, 166

Regénération naturelle 172, 184

Régime d'écoulement permanent 29

Régime transitoire 29

Régosols 47

- à faciès brun eutrophe 118

Régularité 100

Rejaillissement 66, 151, cf Splash

Rejets de vers 86, cf Turricules

Relations Intensités - Durées - Fréquences 80

Relief 150

- en gilgai 47, 118, 150
- nanorelief 96
- mésorelief 96, 150
- microrelief 109, 127, 150

Remobilisation des sables 166

Rendzine 116

Reptation 72

Résidus 184 :

- enfouissement 90
- de récolte 90, 184
- végétaux 86, 150

Résistance à la pénétration 77, 108

Rétraction 68

Retrait 68 :

- limite de 68

Riz 168

- pluvial 166

Roches vertes 120, 138, 164

Rôneraie 162

Rônier 162

Roselière 160

Rugosité 88

RUI 174

Ruissellement 126

S

Sable fin 102

Sable grossier 102

Sahélisation 178

Salant blanc 116

Salant noir 116

Salinisation des terres 168

Saltation 72

Sarclage 164, 184, 186

Schistes 44, 162

Schoenefeldia gracilis 56, 182

Sclerocarya birrea 184

Scytonema sp. 164

Sécheresse 39, 40, 170, 182

Sédimentation 68, 72, 116

Sels 48

- solubles 77

Semelle de labour 88, 118

Sénégal 80, 160, 164, 168, 170, 172, 184

Simulateur de pluie cf : minisimulateur

Simulateur de pluie de type SWANSON 9, 78

Simulation de ruissellement 68

Smectites 65, 72

Socle granito-gneissique 44, 162

Sodium 65, 77, 116, 166, 168, 104,

Sokola 168

Solonetz 48

Solonetz solodisés 48

Sols :

- alcalins 166
- alluviaux 77
- argileux 56, 65, 174
- brun-rouge subarides 47
- bruns eutrophes 47, 49, 74, 118, 164
- bruns subarides vertiques 47
- bruns subarides modaux 47
- dunaires 78, 125
- ferrugineux tropicaux 47, 166
- halomorphes 74, 166, 168
- hydromorphes 48, 125
- limoneux 56

lithosols 47, 118

- régosols 47
- régosols à faciès brun eutrophe 118
- sableux 56, 176
- salins 49, 168
- salsodiques 48
- solonetz 48
- solonetz solodisés 48
- sulfatés acides 77, 116
- vertisols 47, 74, 118, 125

Sonde à neutrons 28

Sorgho 168

Splash 66, cf Rejaillissement

Statut organique 77

Steppe 93

Stock organique du sol 162

STOKES (loi de) 68

Strates 148 :

- arborée 148

- arbustive 148
- herbacée 86, 148
- Structure 102**
 - en plaquettes 104
 - prismatique 104
 - fragmentaire 174
 - fragmentaire altérée 174
- Sulfates 116, 168**
- Surface élémentaire : 10, 93, 128**
 - cultivée C1 126, 128, 142, 162, 164, 166, 176
 - cultivée C2 126, 130, 142, 166, 176
 - cultivée C3 126, 132, 142, 166, 176
 - d'érosion ERO 127, 138, 160, 162, 164, 166, 168, 170, 172, 174, 184
 - de décantation DEC 127, 136, 160, 162, 164, 166, 168
 - de dessiccation DES 126, 134, 160, 162, 164, 168, 170, 172, 176, 184
 - de type grossier G 127, 138, 160, 162, 164, 166, 172, 176
- ST1 174**
 - structurale ST2 126, 134, 162, 164, 168, 172, 176
 - structurale ST3 126, 136, 162, 164, 168, 172, 176
 - termites-vers TV 126, 132
 - vers V 126, 132
- Surfaces salines 168**
- Surpâturage 56, 164, 172, 182**

- T**
- Taches rouille 125**
- Taille des gouttes de pluie 84**
- Tamarindus indica* 162**
- Tamarinier 162**
- Tamesna 44 :**
 - oriental 168
- Tapis végétal 148, 150**
- Tassement 88**
- Tchad 10, 14, 47, 160, 162, 166, 168**
- Termites 58, 88, 184**
 - placages de récolte 58, 96, 126, 132
- Termitières 160, 164**
- Terrasses 186**
- Test d'instabilité structurale 76**
- Texture 76, 102, 118, 127,**
 - cf Tri granulométrique et Granulométrie
- Tikaré 162**
- Togo 9, 14, 140**
- Toposéquence 49**

- Tornades 37, 40**
 - sèches 39, 85
- Transition 100**
- Travail du sol à plat 60**
- Tri granulométrique 68, 72, 74, 110, 116,**
 - cf Texture et Granulométrie
- Tunisie 14**
- Turbulence 66, 68**
- Turricules de vers 96, 126, 132**
- TV 160, 168**
- Typologie 108**
 - des surfaces élémentaires
 - des croûtes 72, 126
 - des formations végétale 148
 - des limites 151

- V**
- V 160, 168**
- Validation du modèle "simulateur" 140**
- Vannage 72**
- Varale 140**
- Variations saisonnières 170**
- Vendous 166**
- Vent : 70, 160, 172, 184**
 - de sable 85
- Vergers 162, 168**
- Vérité-terrain 93, 155, 158**
- Vers de terre 58, 86**
- Vertisols 47, 74, 118, 125,**
 - dégradés 166
- Vésicules 72, 106,**
 - cf Porosité vésiculaire
- Vitesse :**
 - critique du ruissellement 66
 - critique du vent 70
 - d'humectation 84
- Volumes pédologiques 49**

- WYZ**
- Waranienné 182**
- Yaoundé 37**
- Yatenga 160, 176**
- Ziziphus mauritiana* 184**
- Zonalité 47**
- Zone aride 60**
- Zone semi-aride 60**
- Zornia glochidiata* 56**

GLOSSAIRE

Ce glossaire reprend le vocabulaire utilisé mais non défini dans le texte.

Allochtone : issu d'apports, qui ne s'est pas formé in situ.

Alluvions : dépôts dus à un cours d'eau, ou à la mer.

Appétée : se dit d'une plante recherchée par le bétail pour sa consommation

Autochtone : formé sur place.

Colluvions : matériaux d'accumulation dus au ruissellement.

Dégradation du réseau hydrographique : tendance à la disparition du réseau de drainage, conséquence des faibles pentes, qui se traduit par de vastes zones d'inondation, des rivières présentant de nombreux méandres et effluents qui se perdent souvent dans des cuvettes lacustres. Dans le stade ultime de la dégradation, la rivière aboutit par un vaste delta dans une zone endoréique.

Fabacées : nouveau nom des Papilionacées.

Hyétoqramme : graphique de la répartition des intensités de la pluie en fonction du temps.

Isohyète : une courbe isohyète est le lieu géométrique des points d'égale précipitation recueillie pendant une période déterminée.

Limnigraphie : appareil permettant l'enregistrement graphique ou numérique des fluctuations de la surface de l'eau en fonction du temps.

Lithosphère : partie solide de la sphère terrestre.

Pédoplasation : modification de la structure originelle d'un horizon par pédogenèse.

Poacées : nouveau nom des Graminées.

Protogriffe : cette figure initiale d'érosion linéaire se caractérise par l'existence d'une zone nue, le plus souvent allongée dans le sens de la pente, sans incision marquée (de l'ordre du millimètre), mais fortement encroûtée (type ERO).

Zones contributives homogènes : d'un bassin versant. Elles présentent des coefficients de ruissellement identiques; elles contribuent également à la formation des crues du bassin.

LISTE DES TABLEAUX

	pages		pages
Tableau 1 Comparaison des valeurs de F_n mesurées sous pluies simulées et par la méthode MÜNTZ à Abidjan (LAFFORGUE et NAAH, 1976).	16	Tableau 6 Critères de simulation du ruissellement. (FOREST, 1984)	142
Tableau 2 Comparaison des intensités limites de ruissellement (pluie simulée) et des conductivités hydrauliques à saturation (K_{sat} , méthode PIOGER), à Agadez (VALENTIN, 1981).	16	Tableau 7 Caractéristiques du ruissellement pour des sols cultivés	142
Tableau 3 Exemple de protocole de simulation de pluies	26	Tableau 8 Comparaison des pourcentages d'occupation des unités cartographiques d'un petit bassin sahélien établis par quelqu'un formé à la technique (A) et quelqu'un d'inexpérimenté (B)	154
Tableau 4 Coefficient multiplicateur des intensités de pluie en fonction de la hauteur pluviométrique moyenne annuelle (courbes intensités - durées - fréquences.)	81	Tableau 9 Bassins de Gagara. Volumes écoulés annuels observés et calculés (1985)	156
Tableau 5 Nombre de jours de vent en fonction de leur vitesse (en $m.s^{-1}$). Exemple de stations au Mali et en Mauritanie	86	Tableau 10 Bassins de Kazanga et de Kognéré. Occupation des sols, comparaison des états en 1956 et 1980	178
		Tableau 11 Bassin de Kognéré : unités de surface en 1956 et 198	182

LISTE DES FIGURES

	pages		pages
Figure 1 Schéma du mini-simulateur de pluie	23	Figure 12. Ecart pluie au sol - pluie à 1 m en fonction de la latitude (D'après CHEVALLIER et LAPETITE 1987)	41
Figure 2. Comparaison des énergies cinétiques des pluies naturelles (Abidjan) et simulées. (D'après ASSELINE, VALENTIN 1978)	24	Figure 13. Ecart pluie au sol - pluie à 1 m en fonction de la pluie journalière de fréquence annuelle (D'après CHEVALLIER et LAPETITE 1987)	41
Figure 3. Hydrogramme théorique de ruissellement sous averse d'intensité constante	29	Figure 14. Schéma de distribution des sols dans une dépression périphérique	49
Figure 4. Pluie à intensité variable : relations $L_r(P_u)$, $R_x(I)$, $F_n(I)$ D'après CASENAVE (1982)	30	Figure 15. Exemple de toposéquence au BURKINA FASO (GARANGO II). D'après BOULET (1974)	50
Figure 5. Relation $L_r(P_u, I_K)$, exemple de Binnde , parcelle 3 (ALBERGEL et al., 1986)	31	Figure 16. Variation des composantes pédologiques d'un même système de transformation en fonction des conditions bioclimatiques. Cas de l'Afrique de l'Ouest. D'après BOCQUIER (1971).....	52
Figure 6. Détermination de I_1 , exemple de Boulsa, parcelle 1 (ALBERGEL, 1987)	32	Figure 17. Développement de transformation aux dépens des couvertures pédologiques initiales dans l'Afrique de l'Ouest (D'après BOULET, inédit).....	54
Figure 7. Comparaison des résultats obtenus sous pluies natu- relles et simulées (d'après THEBE, 1987).	32	Figure 18. Exemples de profils culturaux.....	62
Figure 8. Déplacements du Front Inter Tropical (F.I.T.)	36	Figure 19. Comparaison des effets de l'air et de l'eau sur les différentes classes granulométriques. D'après HJULSTROM (1935) et BAGNOLD (1937).....	66
Figure 9. Schéma des zones de temps en fonction de leur posi- tion par rapport au F.I.T	37	Figure 20. Mouvements de particules sous l'effet du vent	70
Figure 10. Pluviométrie moyenne mensuelle à Niamey (période 1905 à 1983	39	Figure 21. Triangle textural renseigné en classes de stabilité D'après MONNIER et STENGEL (1982).....	76
Figure 11. Relation entre le coefficient K_3 et la pluviométrie moyenne annuelle P (Bassin du Niger). (d'après Monographie Hydrologique du fleuve Niger	39		

	pages		pages
Figure 22. Triangle textural renseigné en classes d'aptitude à la fissuration. D'après MONNIER et STENGEL (1982)	78	Figure 30 Croûte grossière	114
Figure 23. Variations du coefficient de ruissellement en fonction de la pente	78	Figure 31 Clef de détermination des types de surfaces	127
Figure 24. Courbes intensités-durées de la région de Bamako	81	Figure 32 Reconstitution des Ki à partir des types de surface	140
Figure 25. Evolution saisonnière de D50 à Abidjan. D'après VALENTIN (1984)	82	Figure 33 Niveaux de la mare d'Oursi (1978 - 1980). D'après CHEVALLIER (1986)	155
Figure 26. Fréquence des directions des vents au Mali et en Mauritanie. (D'après Monographie du Niger, BRUNET MORET et al. 1986)	85	Figure 34 Distribution des horizons pédologiques et des surfaces élémentaires le long d'une toposéquence à Bidi (Yatenga, Burkina Faso)	166
Figure 27 Différents types de structure. D'après MAIGNIEN (1969)	106	Figure 35 Evolution cyclique des états de surface dans le Ferlo, Sénégal D'après VALENTIN (1983)	170
Figure 28 Clef de détermination des mops	111	Figure 36 Evolution de la surface du sol en fonction de la distance à un forage dans la région sableuse du Ferlo, Nord-Sénégal. D'après VALENTIN, 1982)	174
Figure 29 Types de croûtes superficielles sur un champ de sorgho	112	Figure 37 Evolution d'une surface sahélienne sous l'effet de la sécheresse et du surpâturage	176

LISTE DES CARTES

	pages		pages
Carte n° 1.		Carte n° 7	
Isohyètes interannuelles 200 et 750-850 mm	13	Exemple de cartographie par levé systématique. Maille de 10 m x 100 m.	
Carte n° 2		Bassin de Waraniene ; Korhogo, Côte d'Ivoire. (d'après GIODA, 1983)	147
Carte de situation des sites étudiés	35	Carte n° 8	
Carte n° 3.		Carte des états de surface du bassin de Kognere, Burkina Faso. D'après VALENTIN (1985)	153
Pluviométrie annuelle et réseau d'isohyètes	38	Carte n° 9	
Carte n° 4.		Carte des états de surface des bassins versants de Gagara, Burkina Faso. D'après VALENTIN (1986)	156
Ensembles géostructuraux (d'après A. FAURE MURET ; in UNESCO, 1971)	42	Carte n° 10	
Carte n° 5		Evolution des surfaces cultivées et des zones érodées, entre 1956 et 1980, Bassin de Kognéré D'après VALENTIN (1985)	180
Carte des sols de l'Afrique de l'Ouest (d'après Boulet et al. 1971, in Atlas International de l'Afrique de l'ouest)	48		
Carte n° 6			
Isohyètes des pluies journalières de fréquence décennale 89	80		

ANNEXES

	pages		pages
Annexe I		Annexe II	
Protocoles de pluies simulées	219	Planches de pourcentages de recouvrement	220

ANNEXES

ANNEXE I

FORME DES PLUIES SIMULÉES DES DIFFÉRENTS BASSINS ÉTUDIÉS

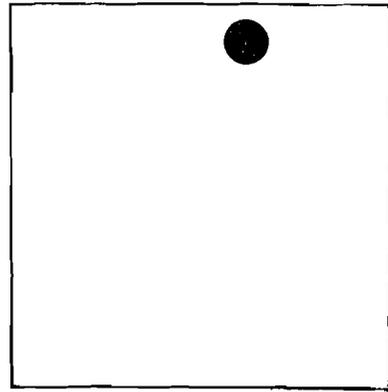
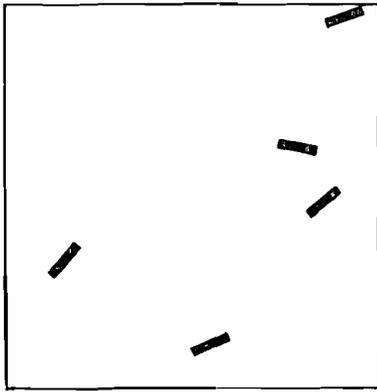
Bassins	Pluie "annuelle"	Pluie "décennale"
AGADEZ (Niger)	10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 30 mn h ⁻¹	10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 30 mn h ⁻¹
KOUNTKOUZOUT (Niger)	10 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 100 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹	20 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 130 mn h ⁻¹ 10 mn à 100 mn h ⁻¹ 10 mn à 80 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 40 mn h ⁻¹
BANIGOROU (Niger)	10 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 80 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 40 mn h ⁻¹	30 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 140 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 100 mn h ⁻¹ 10 mn à 80 mn h ⁻¹ 25 mn à 40 mn h ⁻¹
OURSI (Niger)	10 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 100 mn h ⁻¹ 10 mn à 80 mn h ⁻¹ 10 mn à 40 mn h ⁻¹	30 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 130 mn h ⁻¹ 10 mn à 100 mn h ⁻¹ 10 mn à 80 mn h ⁻¹ 15 mn à 60 mn h ⁻¹
GAGARA (Burkina Faso)	10 mn à 40 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹	30 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 135 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹

Bassins	Pluie "annuelle"	Pluie "décennale"
BINNDE (Burkina Faso)	15 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 60 mn h ⁻¹	15 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 140 mn h ⁻¹ 10 mn à 110 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹
KAZANGA (Burkina Faso)	10 mn à 40 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹	15 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 135 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹
BOULSA (Burkina Faso)	10 mn à 40 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹	30 mn à 30 mn h ⁻¹ 10 mn à 135 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹
KUO (Burkina Faso)	10 mn à 40 mn h ⁻¹ 10 mn à 120 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹	15 mn à 60 mn h ⁻¹ 10 mn à 140 mn h ⁻¹ 10 mn à 110 mn h ⁻¹ 10 mn à 90 mn h ⁻¹ 10 mn à 70 mn h ⁻¹ 10 mn à 50 mn h ⁻¹

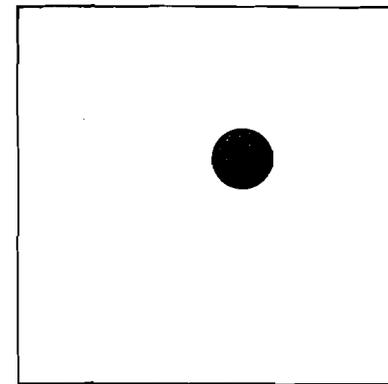
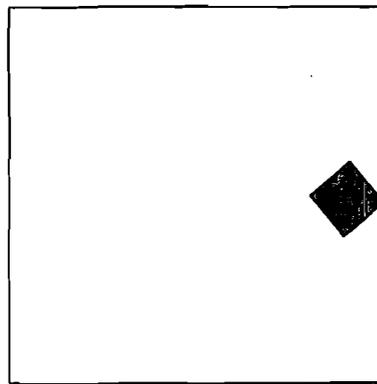
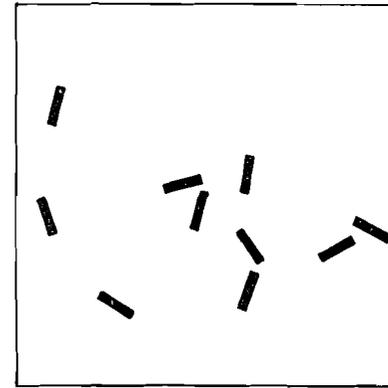
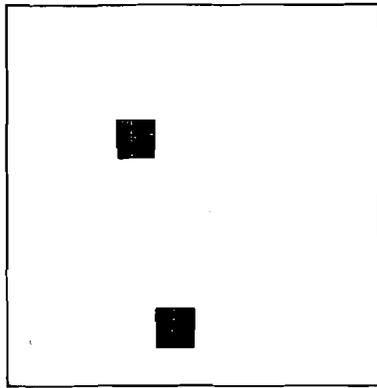
ANNEXE II

PLANCHES DE POURCENTAGE DE RECOUVREMENT

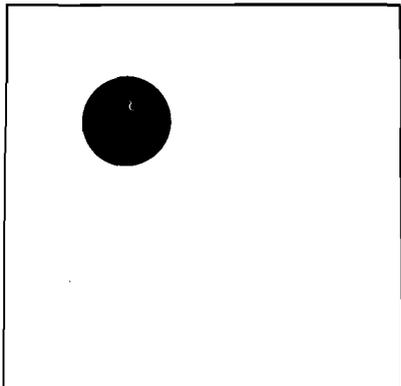
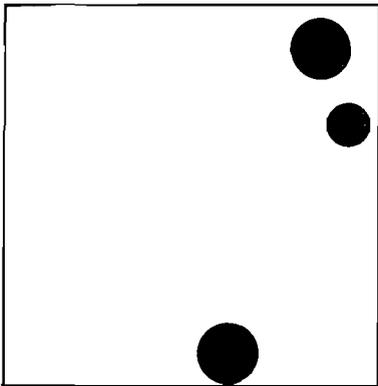
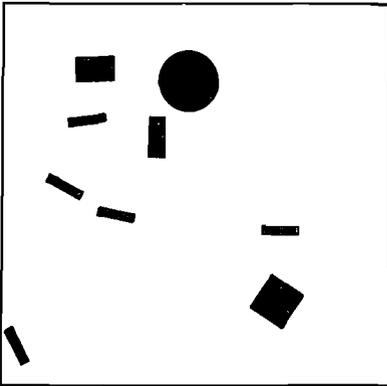
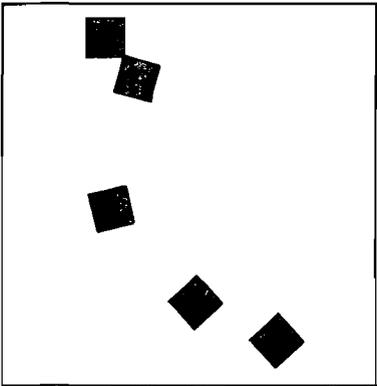
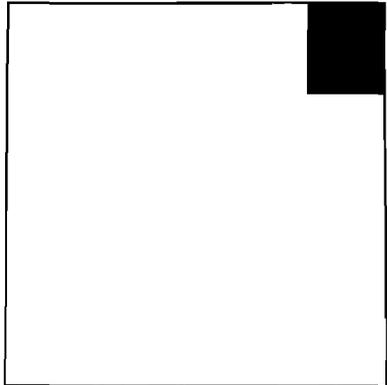
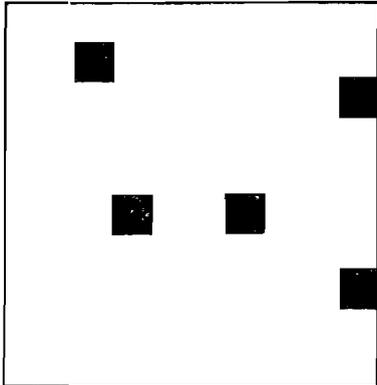
1 %



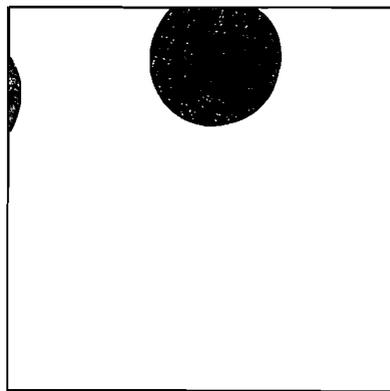
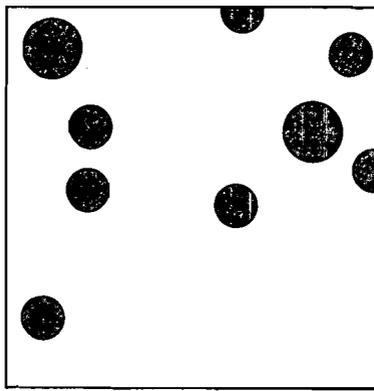
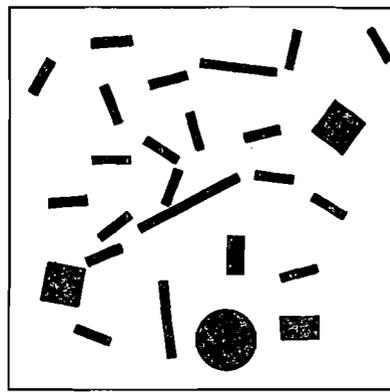
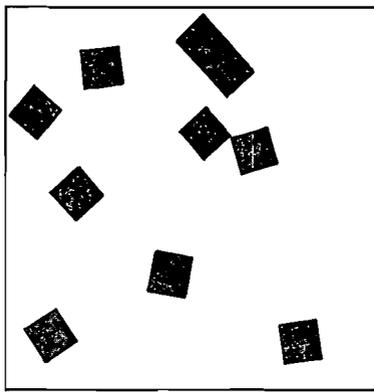
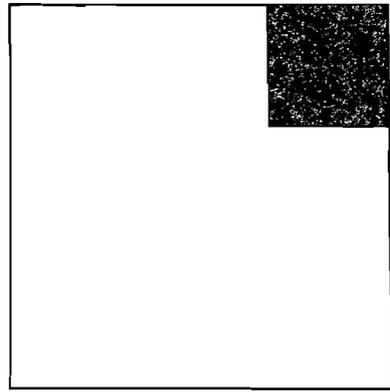
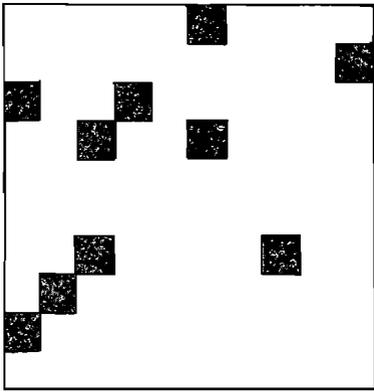
2 %



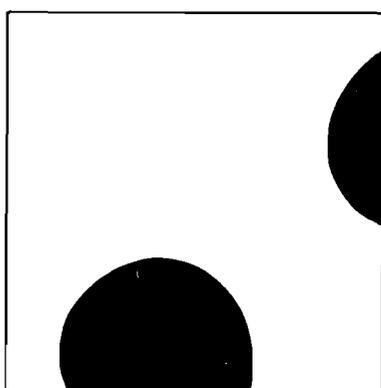
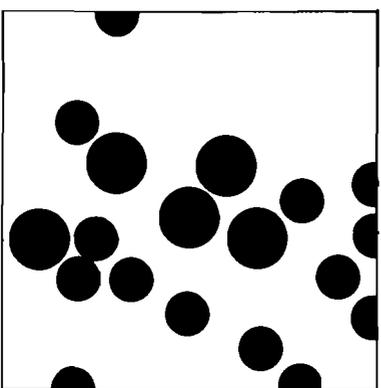
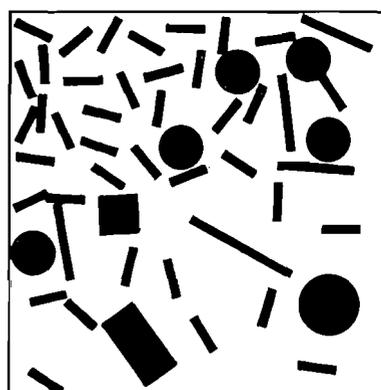
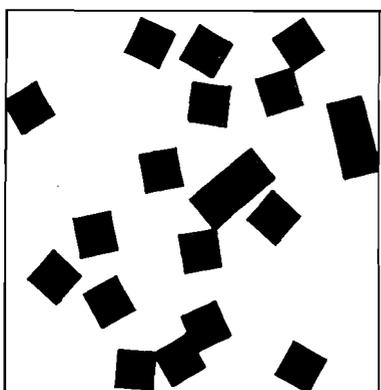
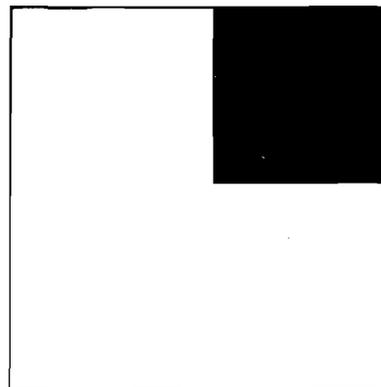
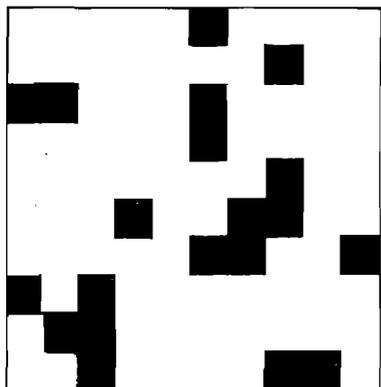
5 %



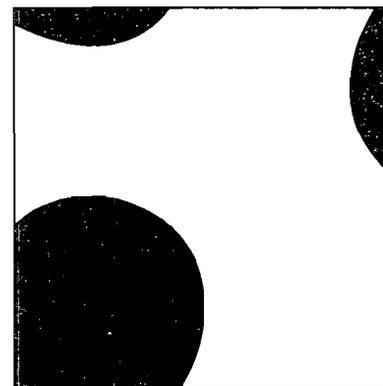
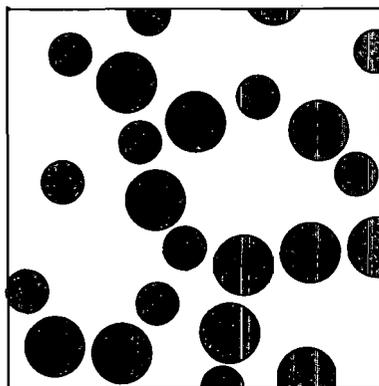
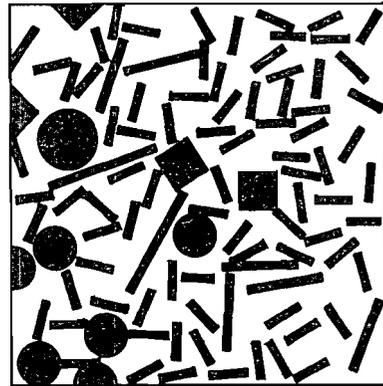
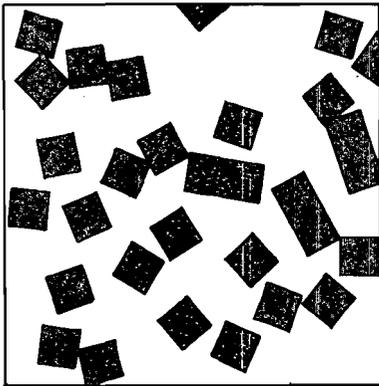
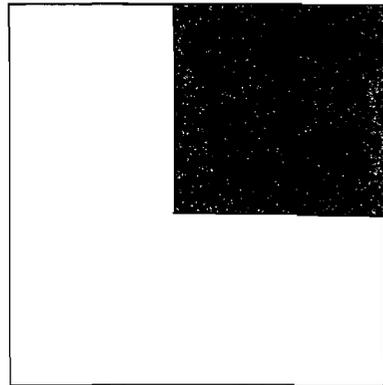
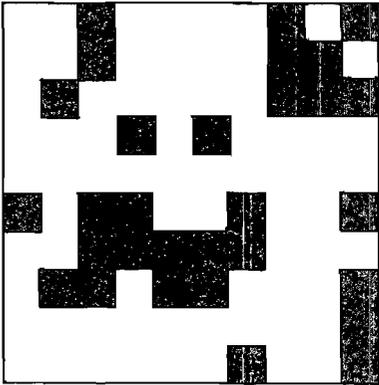
10 %



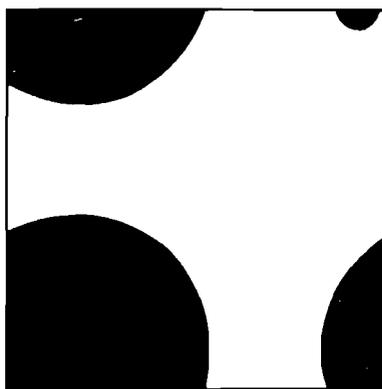
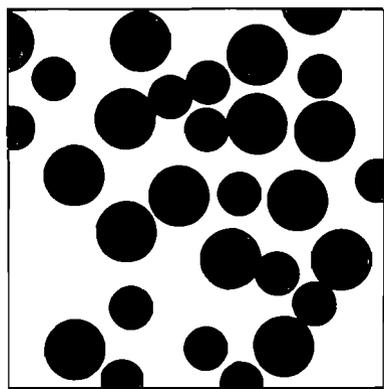
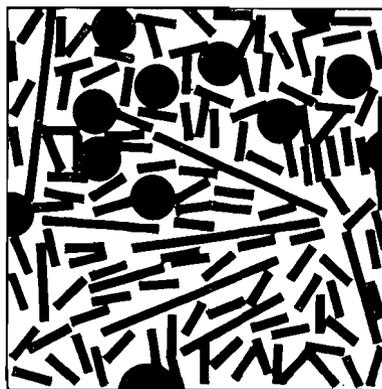
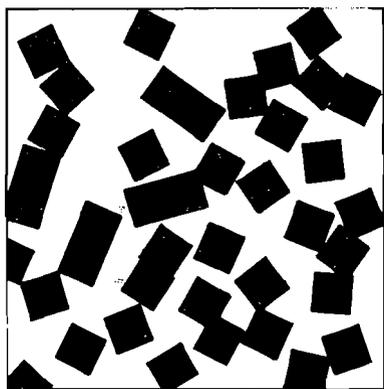
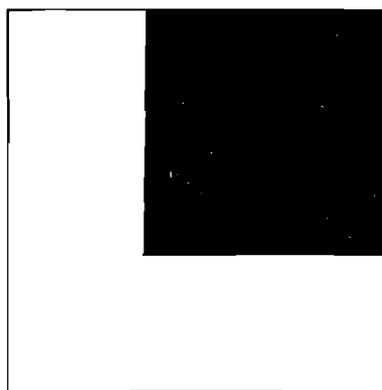
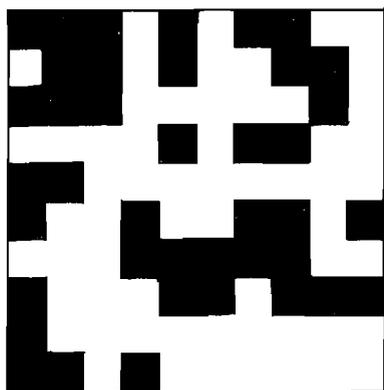
20 %



30 %



40 %



50%

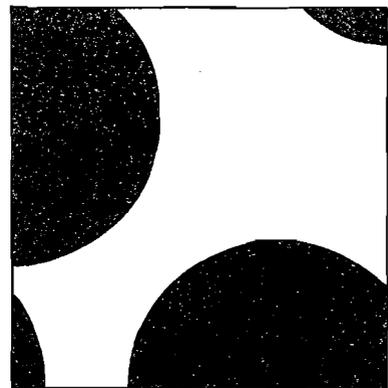
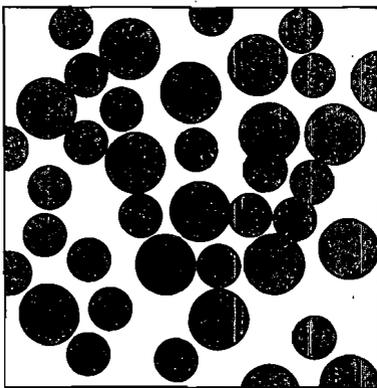
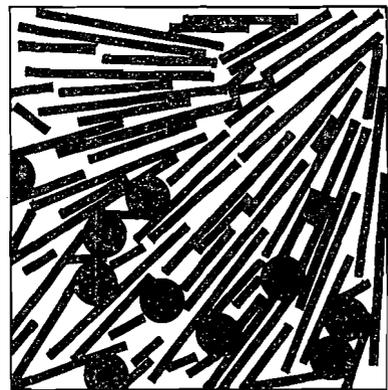
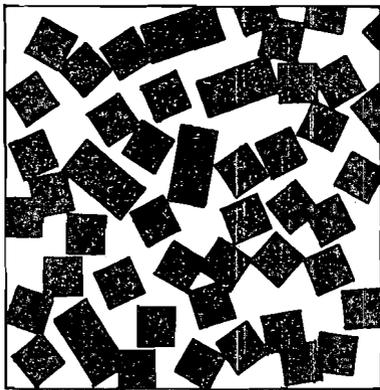
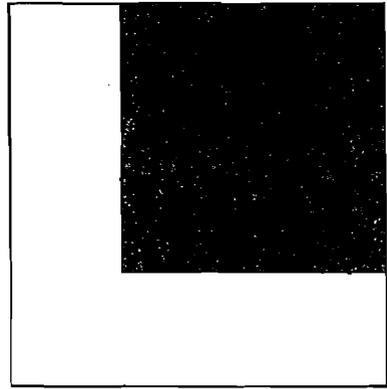
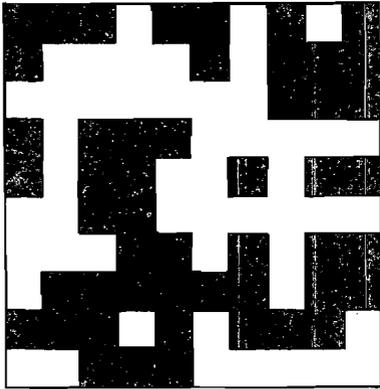


TABLE DES MATIÈRES

	pages		pages
SOMMAIRE	5	LES VARIABLES HYDRODYNAMIQUES	
RÉSUMÉ	7	MESURÉES SOUS PLUIES SIMULÉES	29
ABSTRACT	7	Les quatre phases observées	
PRÉFACE	9	sous pluie simulée	29
AVANT-PROPOS	11	Phase d'imbibition	29
INTRODUCTION	13	Régime transitoire	29
Historique des mesures sous pluies simulées	14	Régime d'écoulement permanent	29
Intérêt des études sous pluies simulées	14	Phase de vidange	30
Les états de surface	18	Variables caractéristiques de l'infiltration	30
Définitions	18	Pluie d'imbibition	30
Influence des états de surface	18	Coefficient d'infiltration	30
Hierarchisation des facteurs conditionnels		Intensité limite de ruissellement	31
de l'infiltration	18	VALIDITÉ DES MESURES	
En zone de forêt tropicale		SOUS PLUIES SIMULÉES	32
(pluviométrie annuelle > 1600 mm)	18	REPRESENTATIVITÉ DES SITES ETUDIÉS	33
En zone de savane humide		SCHÉMA GÉNÉRAL DES RÉGIMES	
(800 < P < 1600 mm)	18	PLUVIOMÉTRIQUES EN AFRIQUE	
En zone de savane sèche		SUBTROPICALE ET INTERTROPICALE	35
(400 < P < 800 mm)	18	Les grands types de climat	
En zone sahélienne sensu stricto		en Afrique tropicale	35
(200 < P < 400 mm)	18	Le climat de la zone sahélienne	38
En zone subdésertique (P < 200 mm)	19	Les précipitations annuelles	38
SIMULATION DE PLUIE		Les variations annuelles	38
ET HYDRODYNAMIQUE SUPERFICIELLE	21	Irrégularité interannuelle de la pluviométrie ;	
PRINCIPES ET CARACTÉRISTIQUES		les sécheresses	39
DU SIMULATEUR DE PLUIE	23	Les précipitations journalières	40
Introduction	23	Pluie au sol	40
Description de l'appareil	23	LES GRANDS TRAITES	
La parcelle de mesures	24	DE LA GÉOLOGIE SAHÉLIENNE	42
L'énergie cinétique des pluies	24	Le socle ou craton Ouest-africain	44
PROTOCOLES DES PLUIES SIMULÉES	26	Le bassin de Taoudeni	44
Forme des pluies	26	Le bassin du Niger (ou bassin de Tamesna)	44
Dispositif expérimental	26	Le bassin sénégalo-mauritanien	44
Mesure de l'humidité du sol	28	LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS	46
		Introduction	46
		Rappel de quelques concepts pédologiques	46
		Les horizons, base de la description du sol	46
		Le profil, base de l'inventaire typologique	46
		La couverture pédologique	47

	pages		pages
Les principaux types de sols de la région sahélienne	47	Les facteurs intrinsèques	74
La classification française	47	Le sol	74
Nouvelles perspectives taxonomiques	49	Les facteurs topographiques	78
distribution dans l'espace et évolution dans le temps	49	les facteurs externes	80
Distribution dans l'espace	49	L'eau	80
Evolution dans le temps	50	Le vent	84
La nouvelle approche pédologique, réponse aux besoins hydrologiques	50	La couverture du sol	86
		L'activité faunique	86
		Les systèmes de culture	88
LE COUVERT HERBACÉ	56	LES SURFACES ÉLÉMENTAIRES	91
Introduction	56	PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'APPROCHE	93
Les grands types de couverts herbacés de la zone sahélienne	56	Introduction	93
Secteur sahélo-saharien	56	Les niveaux d'observation. Les concepts de surface élémentaire et d'état de surface	93
Ssecteur sahélien typique	56	Les conditions d'observation	93
Secteur sahélo-soudanien	56		
Secteur soudano-sahélien	56	DESCRIPTION DE LA SURFACE ÉLÉMENTAIRE	94
LA MÉSOFAUNE	58	Introduction	94
Introduction	58	Le couvert herbacé ou cultural	94
Les vers de terre	58	Le microrelief	96
Les termites et les fourmis	58	les constructions de la mésofaune	96
		Les microhorizons	96
LE TRAVAIL DU SOL	60	Définitions	96
Introduction	60	Les critères de description	98
Le profil cultural	60	Les microhorizons de référence	108
Les principaux types de travail du sol	60	Les croûtes de surface	110
		Clef de détermination	110
LES PROCESSUS ET LES FACTEURS DE RÉORGANISATION SUPERFICIELLE	63	Les principales croûtes sahéliennes	110
		Quelques croûtes plus rares	116
LES PROCESSUS DE FORMATION DES CROÛTES DE SURFACE	65	Le sol	118
Les principaux mécanismes	65	Principes généraux	118
La mobilisation des particules par humectation	65	Les critères retenus	118
L'impact des gouttes de pluie	66	La fiche des relevés minimaux	120
Le ruissellement	66		
La dessiccation	68	LES PRINCIPALES SURFACES ÉLÉMENTAIRES	125
Action du vent	70	Les surfaces non testées sous pluie simulée	125
Typologie génétique des croûtes	72	Les sols hydromorphes	125
Croûte structurale	72	Variables caractéristiques du ruissellement et de l'infiltration	125
Croûte de ruissellement	72	Ruissellement	126
Croûte d'érosion	72	Infiltration	126
Croûte de dépôts éoliens	74	Clef de détermination des surfaces élémentaires	126
Croûte de décantation	74	Surfaces cultivées	126
Croûte de dessiccation	74	Surfaces naturelles non ou peu anthropisées	126
		Les grands types de surfaces élémentaires	128
LES FACTEURS DE RÉORGANISATION SUPERFICIELLE	74		

	pages		pages
Surface de type cultivé C1	128	Les formes hautes	162
Surface de type cultivé C2	130	Les milieux cuirassés	164
Surface de type cultivé C3	132	Les piémonts	164
Surface de type Termites-vers TV	132	Les milieux sableux	164
Surface de type Vers V	132	Les formes basses	166
Surface de type dessiccation DES	134	Les surfaces salines	168
Surface de type structurale 2 ST2	134		
Surface de type structurale 3 ST3	136	LA DYNAMIQUE ÉVOLUTIVE	
Surface de type décantation DEC	136	DES ÉTATS DE SURFACE	170
Surface de type érosion ERO	138	Introduction	170
Surface de type grossier	138	Les modifications des états de surface	170
Validation de la méthode	140	Dynamique évolutive	
		des états de surface naturels	170
EXEMPLE D'UTILISATION		Evolution des surfaces pâturées	172
DE LA TYPOLOGIE : CALAGE D'UN MODÈLE		Evolution sous l'effet des cultures	174
AGROCLIMATOLOGIQUE	142	Influence de la mise en culture	
		sur le ruissellement et l'infiltration	178
LES VARIATIONS DANS L'ESPACE		Modification des états de surface :	
ET DANS LE TEMPS	145	Exemple de deux bassins cultivés	
		du plateau mossi	178
LA MÉTHODE CARTOGRAPHIQUE	147	Conséquences de la modification des états de surface	
Introduction	147	sur le ruissellement	178
Les modalités de réalisation	148	Quelques parades à la dégradation	182
Les relevés de terrain	148	Le maintien et la reconstitution du couvert	182
Représentation cartographique	151	Quelques pratiques culturelles	184
Exemple : le bassin de Boulsa-Kognere		Vers une nouvelle gestion de l'espace	186
(Burkina-Faso)	152		
La reproductibilité de la méthode	154	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	188
L'EXTENSION SPATIALE : INTÉRÊT		BIBLIOGRAPHIE	193
ET LIMITES DE LA TÉLÉDÉTECTION	155	INDEX	205
Introduction	155	GLOSSAIRE	212
Extension cartographique :		LISTE DES TABLEAUX	213
l'exemple d'Oursi	155	LISTE DES FIGURES	214
Transposition cartographique :		LISTE DES CARTES	216
les bassins de Gagara	156	LISTE DES ANNEXES	216
Les limites de la télédétection	158	ANNEXES	217
		TABLE DES MATIÈRES	227
QUELQUES ÉTATS DE SURFACE			
CARACTÉRISTIQUES	158		
Introduction	158		
Quelques formations végétales particulières	158		
Naturelles	158		
Anthropisées	162		
Les surfaces associées aux grandes formes			
du relief	162		

Imprimerie IMB - Tél. 42.87.66.06

ORSTOM Editeur
Dépôt légal : décembre 1989
Microédition ORSTOM Bondy

▷▷ ACTIQUES

Qui vise à instruire.

Qui appartient à la langue des sciences et des techniques.

ISSN : 1142-2580
ISBN : 2-7099-0984-7
Editions de l'ORSTOM
70, route d'Aulnay 93143 BONDY Cedex

Photo de couverture :
*Culture irriguée de bas-fond, au pied d'une dune,
Ader Doutchi, Niger.*
Cliché : (Christian VALENTIN)
Maquette, mise en page : M. A. BRAY