

## Amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés du Nord-Cameroun en vue de leur réhabilitation

Dominique MASSE (1), Christian FLORET (2), Roger PONTANIER (3) et Lamine SEINY BOUKAR (4)

(1) Orstom/MAA, bureau RZA Cefe/CNRS, route de Mende, 34033 Montpellier cedex, France.

(2) Cefe-CNRS, route de Mende, 34033 Montpellier cedex, France.

(3) Orstom/MAA, 7, rue Teimour, BP 434, 1004 Tunis-El Menzah, Tunisie.

(4) Ira, BP 33, Maroua, Cameroun.

### RÉSUMÉ

*L'objectif de ce travail est d'étudier les moyens d'amélioration du régime hydrique de vertisols dégradés et érodés dans les régions semi-arides du Cameroun. Les pratiques testées concernent des petits aménagements hydroagriques de type « pitting », bandes alternées, « microcatchment » et casiers, associés à certaines façons culturales comme le labour ou le buttage. Sur les sols fortement dégradés, le suivi de l'évolution des réserves hydriques du sol a montré que l'amélioration du régime hydrique était limitée après deux années de mise en place, l'absence de macroporosité fissurale restreignant considérablement la circulation de l'eau dans ces sols riches en argiles de type smectite. Sur des vertisols moyennement dégradés, la conservation de la macroporosité fissurale est liée à des aménagements tels que les casiers, qui maintiennent une charge hydraulique élevée dans cette porosité et assurent une importante humectation en profondeur. Une meilleure compréhension du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés a permis de présenter une modélisation des termes du bilan hydrique.*

**MOTS CLÉS :** Nord-Cameroun — Vertisols — Dégradation — Réhabilitation — Bilan hydrique — Modélisation — Aménagement des sols.

### ABSTRACT

#### SOIL WATER BALANCE IMPROVEMENT OF THE DEGRADED VERTISOLS IN NORTHERN-CAMEROON FOR THEIR REHABILITATION

*This study concerns the means to improve the soil water balance of degraded and eroded vertisols in the semi-arid zone of Cameroon. The tested practices are small soil surface workings such as pitting, alternated strips, microcatchment or gridworks of small ditches, associated with some tillages like ploughing or earthing-up. On strongly degraded soils, the evolution of the total quantity of soil water reserves showed that, after two years of observations, the water regime improvement was limited; in fact, in these soils which are rich in smectite clay, the lack of cracking porosity, after degradation, restricted considerably the water flow. On fairly degraded vertisols, the cracks conservation are obtained with managements like gridworks of small ditches, which can maintain a high hydraulic charge on macroporosity, and ensure an important moistening in depth of soil. A better understanding of degraded vertisols water regime allowed to propose a soil water balance model.*

**KEYWORDS :** Northern-Cameroon — Vertisol — Degradation — Rehabilitation — Water balance — Modelization — Soil management.

### RESUMEN

#### MEJORA DEL RÉGIMEN HÍDRICO DE LOS VERTISUELOS DEGRADADOS EN EL NORTE DE CAMERÚN CON OBJETO DE SU REHABILITACIÓN

*El objetivo de ese trabajo consiste en estudiar los medios para mejorar el régimen hídrico de los vertisuelos degradados y erosionados en las regiones semiáridas de Camerún. Las prácticas probadas conciernen a unas pequeñas*

*instalaciones hidroagrícolas de tipo pitting, bandas alternadas, microcatchment o casilleros que se asocian con ciertos trabajos del campo como la labor o el aporcado. Sobre los suelos fuertemente degradados, la evolución de las reservas hídricas del suelo ha mostrado que la mejora del régimen hídrico era limitada después de dos años de instalación; la falta de macroporosidad por fractura limitando considerablemente las circulaciones del agua en esos suelos ricos en arcilla de tipo esmectita. Sobre unos vertisuelos medianamente degradados, la conservación de la macroporosidad por fractura está ligada con instalaciones tales como los casilleros que mantienen una carga hidráulica elevada en esa porosidad y permiten una humectación importante a fondo. Comprender mejor el funcionamiento hídrico de los vertisuelos degradados ha permitido presentar una modelización de los términos del balance hídrico.*

PALABRAS CLAVES : Vertisuelos — Norte de Camerún — Degradación — Rehabilitación — Balance hídrico — Modelización — Habilitación de los suelos.

## INTRODUCTION

La province de l'Extrême-Nord du Cameroun est située approximativement entre le 10<sup>e</sup> et le 13<sup>e</sup> parallèle nord. Cette région est soumise à un climat de type soudano-sahélien à sahélien (OLIVRY, 1986).

Les premiers inventaires des sols du Nord-Cameroun datent des années 1950 ; une synthèse pédologique concernant les sols et les ressources en terres a été réalisée par BRABANT et GAVAUD (1985). Plus récemment, des études faites dans la région de Maroua ont permis de caractériser les principaux systèmes écologiques représentatifs de la région, leur fonctionnement et la dynamique d'évolution du milieu (PONTANIER *et al.*, 1984 ; THEBE, 1987 ; CEE, 1988 ; PONTANIER et THEBE, 1989 ; SEINY BOUKAR, 1990 ; SEGHERI, 1990). Tous ces auteurs ont montré l'incidence majeure de la dégradation des sols dans cette région. Celle-ci se caractérise par la diminution de la réserve utile du sol et de la profondeur maximale humectée, ainsi que par la baisse de l'efficacité des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol. Le régime hydrique des sols subit alors un dysfonctionnement qui aboutit à l'augmentation du stress hydrique pour les végétaux. La dégradation des sols contribue donc à terme au déséquilibre des écosystèmes et à la baisse de fertilité du milieu (GAVAUD, 1971 ; SEINY BOUKAR, 1990).

Les causes les plus souvent avancées sont d'ordre climatique ; la baisse de la pluviosité annuelle a eu une incidence sur la croissance de la végétation qui a vu son rôle protecteur contre l'agressivité des pluies diminuer, ce qui a provoqué d'importants processus d'érosion (BRABANT et GAVAUD, 1985 ; ROOSE, 1990 a ; BOLI *et al.*, 1991). Par ailleurs, les modalités de gestion du milieu par l'homme ont amplifié la sécheresse climatique. On note en effet, au cours des dernières décennies, une surexploitation des ressources agropastorales, marquée notamment par la diminution des temps de jachère des terres cultivées. Une sécheresse de type édaphique, au sens défini par FLORET et PONTANIER (1984), intervient alors dans les phénomènes de dégradation et d'érosion.

Actuellement, dans cette région, on est en présence de vastes surfaces cultivées sporadiquement, voire abandonnées, en raison des faibles rendements et de l'irrégularité de la production, d'où leur appellation de terres marginales (CEE, 1988). Cette dégradation ne semble pas réversible par les seuls processus de la régénération naturelle. Les systèmes ont franchi des seuils d'irréversibilité (FLORET et PONTANIER, 1982 ; ARONSON *et al.*, 1993) et une intervention humaine forte est nécessaire pour redonner à ces sols une productivité durable.

Dans le cadre d'une forte croissance démographique et de besoins en terres cultivables, des études sur les moyens de réhabilitation ou de restauration des terres dégradées et érodées se justifient. De telles études sur la dynamique progressive ont aussi un intérêt sur le plan de la recherche fondamentale en écologie, puisqu'elles permettent notamment de tester les théories écologiques concernant l'évolution des écosystèmes. La « réhabilitation », selon BRADSHAW (1987), vise à rétablir une partie des propriétés biologiques et physiques de l'écosystème d'origine pour maximiser la production, contrairement à la « restauration », dont la finalité est de reconstituer totalement les propriétés écologiques originelles, souvent à des fins de conservation du milieu. Une écologie de la réhabilitation se fait jour actuellement, qui privilégie le retour à un meilleur fonctionnement d'un site perturbé ou dégradé sans viser l'écosystème originel comme objectif ultime (ALLEN, 1988).

Des techniques variées de réhabilitation de sols dégradés et érodés sont utilisées en zone sahélienne ou soudano-sahélienne (ROOSE 1990 b, 1992 ; SERPANTIÉ *et al.*, 1992). Elles concernent le plus souvent des petits ouvrages anti-érosifs, des plantations, ou des mises en défens temporaires, généralement sur des sols à texture relativement grossière.

Au Nord-Cameroun, un diagnostic sur la dynamique des écosystèmes et de leurs réponses aux perturbations anthropiques a été le point de départ d'études concernant la réhabilitation des terres marginales sur des sols argileux de type vertisol (CEE, 1988). Cet article se propose d'ana-

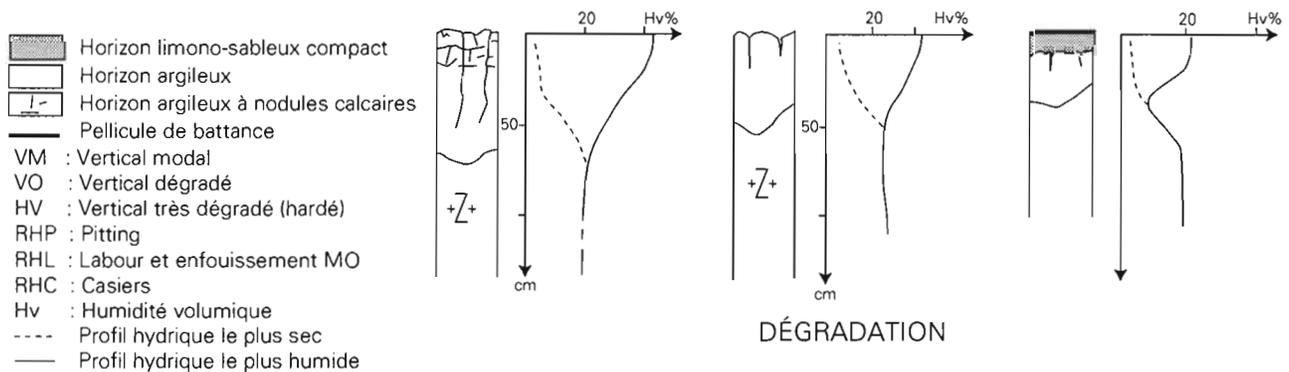
lyser plus particulièrement les résultats obtenus concernant les moyens susceptibles d'améliorer le régime hydrique en vue d'une réhabilitation des vertisols dégradés, largement représentés au Nord-Cameroun. Deux niveaux de dégradation des vertisols, sols « hardés » (très dégradés) et vertisols dégradés (moyennement dégradés), ont fait l'objet de petits aménagements de surface. L'évolution de l'humidité du sol a été suivie pour en tester l'efficacité. L'étude a été complétée par une modélisation du bilan hydrique.

MATÉRIEL ÉTUDIÉ

Les vertisols s'étendent au Nord-Cameroun sur près de 1,2 million d'hectares (DUDAL, 1965). Ils sont, dans cette région, une composante commune à de nombreux éco-

systèmes. Leur usage est en général de type pastoral, mais leurs propriétés physico-chimiques et plus particulièrement leur capacité de rétention en eau en font des sols propices à une mise en culture spécifique : le sorgho de contre-saison (*Sorghum durum*) (ECKEBIL *et al.*, 1972).

Dans leur synthèse pédologique, BRABANT et GAVAUD (1985) ont noté sur ce type de sols des phénomènes d'érosion et de dégradation très alarmants ; 48 % des vertisols lithomorphes sont répertoriés par ces auteurs sous une forme dégradée ou érodée. La dégradation des vertisols est marquée plus particulièrement par l'évolution de la structure prismatique des horizons supérieurs vers une structure polyédrique fine puis massive (SEINY BOUKAR, 1990). Simultanément, les taux de matière organique diminuent ainsi que les proportions d'éléments fins dans l'horizon superficiel (fig. 1). Il en résulte une modification



SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES		En bon état - modal	Dégradé tronqué	Hardéisé irréversible
CARACTÉRISTIQUES HORIZON DE SURFACE (0-20 cm)	RU (mm)	40-45	30-35	20-25
	CEC (mg/100g)	35	25	17
	Mat. org. (%)	1,65	1,05	0,8
	A + L (%) (0-20 μ)	60-65	40-45	30-35
Coefficient d'efficacité moyen de la pluie (Ke %)		75-85	50-60	30-40
Augmentation maximale du stock d'eau sur 80 cm (mm)		80-120	60-80	25-35
Profondeur maximale humectée en année moyenne (cm)		60-70	50-60	30-40
Nombre d'espèces herbacées		15-18	8-13	7-9

FIG. 1. — Caractérisation physico-hydrigue des différents stades de dégradation des vertisols décrits au Nord-Cameroun par SEINY BOUKAR (1990).  
*Physico-hydric characterisation of the different stages of vertisol degradation described in Northern-Cameroun by SEINY BOUKAR (1990).*

des capacités d'échange cationique et de la réserve utile, qui diminue de moitié environ dans les vingt premiers centimètres. La susceptibilité à l'encroûtement de surface et la diminution des mouvements de retrait et de gonflement impliquent une diminution du coefficient d'efficacité moyen des pluies ; celles-ci deviennent alors fortement érosives. La végétation est marquée par une diminution de la richesse floristique liée à l'augmentation de l'aridité édaphique (SEGHERI, 1990 ; DONFACK, 1992). Au Malawi, MITCHELL (1987) a décrit des phénomènes similaires sur des vertisols cultivés intensivement en coton.

Pour notre étude, nous avons considéré deux stades de dégradation dans la séquence vertisolique décrite par SEINY BOUKAR (1990) sur le bassin versant de Mouda.

Dans le premier type de sol étudié, désigné comme « vertisol dégradé », l'expression des caractères vertisoliques de surface devient faible. On observe notamment la présence d'un microrelief plat, l'existence de phénomènes de battance et la diminution de la macroporosité fissurale, qui reste cependant encore fonctionnelle. Ces sols font l'objet à l'heure actuelle d'une mise en culture sporadique. L'amélioration du régime hydrique entreprise dans cette étude vise à favoriser la régularisation de la mise en culture de ces sols, en assurant l'adéquation des disponibilités en eau avec les besoins de la plante cultivée au cours du cycle.

Le second stade de dégradation est désigné par le terme « hardé » emprunté à la langue fulfuldé, qui définit communément toute terre peu propice à une mise en culture (VAILLE, 1970). Le sol est caractérisé par un horizon superficiel sablo-argileux massif et compact, recouvert d'une épaisse pellicule de battance. Cet horizon, épais de 5 à 20 cm, recouvre un horizon sous-jacent argileux et vertique, présentant des nodules calcaires. Sur ces terres, aux propriétés physico-hydriques particulièrement défavorables, une tentative de « réactivation biologique » a été lancée, qui ne vise pas dans un premier temps à une remise en culture. Des pratiques permettant l'augmentation des réserves en eau du sol, concomitante à une augmentation des teneurs en matière organique, devraient redonner à ces sols un statut qui leur assurerait une production pastorale durable.

L'amélioration de l'efficacité des pluies constitue donc le point essentiel pour une réhabilitation de tels sols (MITCHELL, 1987 ; FLORET *et al.*, 1991). Pour atteindre cet objectif, nous avons privilégié ici des méthodes basées sur la réalisation de petits aménagements de contrôle du ruissellement de surface applicables par les paysans (CEE, 1988 ; MASSE, 1992).

#### MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET INDICATEURS SUIVIS

Nous avons retenu quatre types d'aménagement associés à des façons culturales dont le rôle principal est de

capter le ruissellement, et de favoriser l'augmentation des quantités d'eau infiltrées et stockées dans le sol :

— l'aménagement « pitting » est constitué de trous de 1 m x 0,30 m x 0,15 m ; ceux-ci sont disposés en quinconce sur la parcelle ;

— l'aménagement en « bandes alternées » est basé sur l'alternance de bandes labourées et de bandes non labourées de 5 m de largeur se situant en amont et jouant le rôle d'impluvium ;

— l'aménagement « microcatchment » obéit au même principe que l'aménagement « bandes alternées » mais se différencie par la présence d'une diguette sur le front aval de la bande réceptrice du ruissellement provenant de l'impluvium ;

— l'aménagement en « casiers » consiste en un carroyage de la surface du sol par des diguettes de 20 à 30 cm de hauteur ; les dimensions de chaque casier sont de 5 m x 5 m.

La figure 2 donne une description schématique de ces aménagements.

Les aménagements testés sur les sols hardés sont le pitting, les bandes alternées et le microcatchment ; tous sont comparés à une parcelle témoin sans aménagement particulier. En dehors de l'aspect de l'augmentation de l'infiltration des eaux météorites dans le sol, l'objectif sur les sols hardés est également d'améliorer leur statut organique. Des labours successifs sont donc réalisés, qui permettent l'enfouissement de la végétation spontanée. Seuls les traitements « bandes alternées » et « microcatchment » sont concernés par ces façons culturales superficielles (IRA-CNS, 1989).

En ce qui concerne la régularisation de la mise en culture de contre-saison des vertisols dégradés, l'objectif est d'obtenir le maximum de réserve hydrique en fin de saison des pluies, période qui correspond à la phase d'installation de la culture. Deux aménagements, les casiers et le microcatchment, sont comparés à l'itinéraire traditionnel pour lequel aucun ouvrage de collecte et de conservation des eaux n'est réalisé.

Le dispositif expérimental est constitué de deux répétitions par type d'aménagement et de sol. Les aménagements ont été testés sur des parcelles élémentaires de 30 m x 15 m. Les indicateurs suivis sont l'évolution des réserves hydriques du sol à partir de mesures par humidimétrie neutronique. Le pas de temps d'acquisition des données est de six à huit jours. Sur les vertisols dégradés, le suivi d'une culture de sorgho repiqué de variété « muskwaari » a également fourni des indications sur l'efficacité des différents aménagements testés (MASSE, 1992).

La pluviosité a été suivie, quotidiennement, grâce à trois pluviomètres, placés à 1,5 m de hauteur ; un sur le site des sols hardés, et deux sur celui des vertisols dégradés.



## RÉSULTATS

## Effets des traitements sur la réserve en eau totale pour le faciès le plus dégradé, les sols hardés

La figure 3 présente les courbes comparatives d'évolution des réserves hydriques pour les différents traitements, entre d'une part 0 et 40 cm et d'autre part 40 et 100 cm de profondeur.

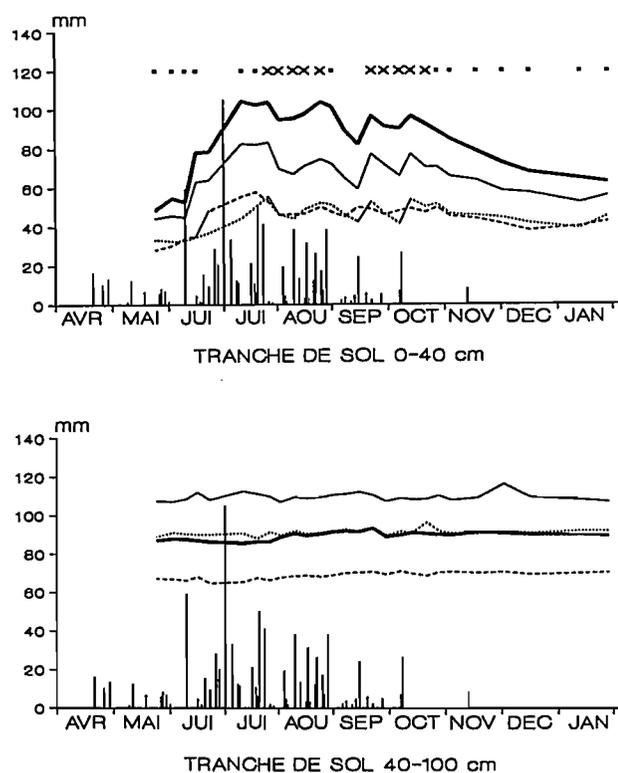


FIG. 3. — Évolution de la réserve en eau totale sur sol « hardé » en 1990, sur les tranches 0-40 cm, 40-100 cm et 0-100 cm, pour les traitements bandes alternées (—), microcatchment (—), pitting (...) et témoin (---).

Les petits carrés noirs indiquent une différence significative  $p = 0,95$  entre tous les aménagements ; x : différence significative  $p = 0,95$  entre bandes alternées et microcatchment. Les histogrammes représentent les hauteurs des précipitations journalières.

Soil water content evolution on « hardé » soil in 1990, from 0 to 40 cm depth, 40 to 100 cm depth, for the different treatments: alternated strips (—), microcatchment (—), pitting (...) and control (---).

Les variations d'humidité volumique concernent essentiellement les quarante premiers centimètres. Pendant toute la saison des pluies, la tranche de sol 40-100 cm ne présente pratiquement aucune variation de réserve hydrique totale pour les trois aménagements.

La réserve en eau totale, mesurée entre 0 et 40 cm de profondeur, est significativement différente entre les traitements « bandes alternées » et « microcatchment », d'une part, et les traitements « pitting » et « témoin », d'autre part. Toutefois, cette différence s'estompe dès que l'on a une période sèche notable au cours de la saison des pluies (cas du mois de septembre 1990).

Les aménagements microcatchment et bandes alternées modifient donc la réserve hydrique totale par rapport au témoin, avec respectivement un accroissement de 88 % et 48 % en valeur cumulée sur l'ensemble de la saison de mesure (tabl. I). Les maximums de réserve sont atteints vers la fin de la première décennie de juillet, avec un nouveau pic au cours de la troisième décennie d'août.

Sur l'aménagement pitting, aucune amélioration du bilan hydrique n'apparaît à 50 cm du trou, distance à laquelle ont été mesurées les teneurs en eau. Ce résultat est confirmé par des mesures d'humidité par prélèvement à la tarière, dans le trou, et à des distances intermédiaires du tube. La figure 4 présente les résultats d'une série de mesures effectuées en octobre 1990 après une pluie de 26 mm. Les échantillons ont été prélevés à des distances de 20 cm et de 40 cm, à partir de la bordure du trou. On constate que les teneurs en eau ne sont pas modifiées à ces distances. En revanche, l'observation de l'humectation jusqu'à 50 cm de profondeur à partir du fond du trou montre que la circulation verticale est plus aisée.

Enfin, du début du mois de juillet jusqu'à la fin du mois d'août, de nombreuses flaques d'eau pratiquement permanentes ont été observées sur les bandes labourées des aménagements microcatchment et bandes alternées ; les premières pluies assurent une recharge hydrique des quarante premiers centimètres, ensuite les quantités d'eau « récoltées » sont plus importantes que les quantités d'eau infiltrables et des excès d'eau apparaissent alors dans l'horizon superficiel. L'aménagement pitting présente le même phénomène ; les trous concentrent l'eau de ruissellement et se vident très lentement, voire pratiquement pas, tout au long de la saison des pluies.

TABLEAU I

Réserves hydriques totales et disponibles pour les différents aménagements testés sur sols « hardés ». Les mesures concernent la tranche de sol comprise entre 0 et 40 cm de profondeur et la période allant de mai 1990 à janvier 1991  
*Soil-water content and availability for different practices tested on « hardé » soils. The data concern the soil volume between 0 and 40 cm depth, during the period between May, 1990 and January, 1991*

Aménagements	Réserves hydriques totales maximales (mm)	Cumul des réserves hydriques journalières (témoin = 100)	Durée de présence des réserves hydriques disponibles (mois)
Bandes alternées	83	148	1,6
Microcatchment	104	188	4,9
Pitting	56	101	0
Témoin	58	100	0

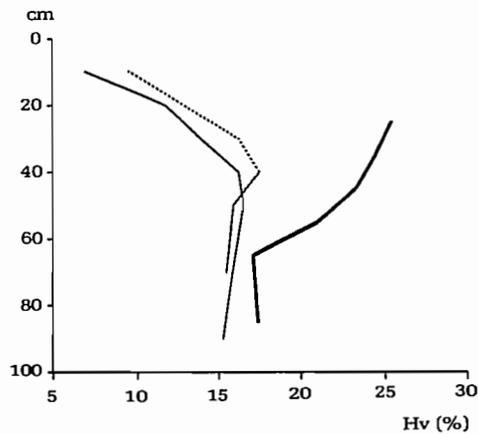


FIG. 4. — Influence du pitting sur le profil hydrique à 20 cm (---) et 40 cm (—) de la bordure du trou, et dans le trou (—), sur sol « hardé » en octobre 1990.

*Influence of the pitting treatment on the hydric profile from the pit distance of 20 cm (---) and 40 cm (—), and in the pit (—) on « hardé » soil in October 1990.*

**Effets des traitements sur l'évolution de la réserve en eau totale pour les vertisols dégradés**

La figure 5 présente l'étude comparée de l'influence des différents aménagements sur l'état de la réserve hydrique totale.

Sur les cinquante premiers centimètres, la réserve en eau totale augmente par paliers. Cela correspond à l'humectation consécutive aux deux épisodes pluvieux du mois de juin. À partir du mois de juillet, la réserve hydrique fluctue autour d'une valeur élevée : de l'ordre de 180 à 190 mm sur les casiers, et de 150 à 170 mm sur le microcatchment. Le témoin se maintient à un niveau plus bas, de l'ordre de 100 mm. Le réservoir inférieur, de 50 à 100 cm, présente des variations nettement moins importantes qui ne sont pas directement concomitantes avec les épisodes pluvieux.

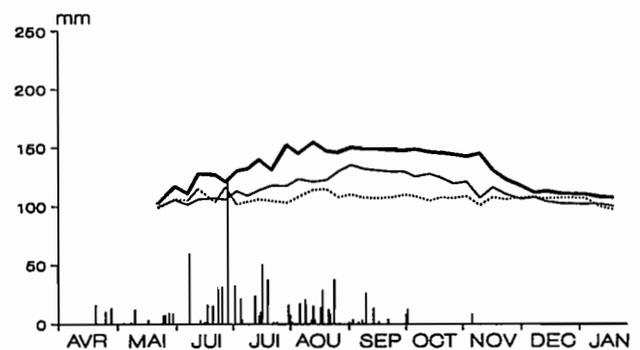
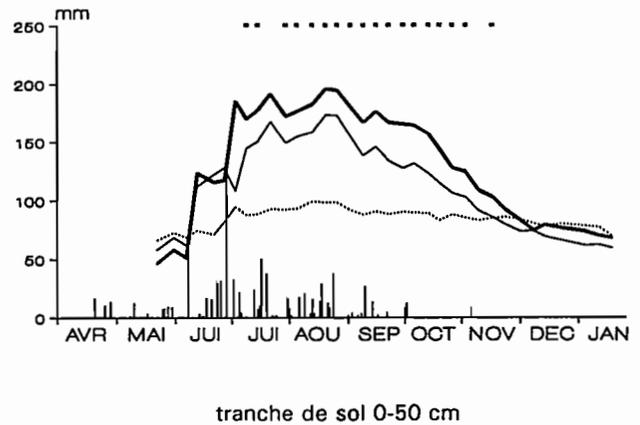


FIG. 5. — Évolution des réserves hydriques totales en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm, pour les aménagements en casiers (—), microcatchment (—) et témoin (---), sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison.

Les petits carrés noirs indiquent une différence significative entre les trois traitements à la date considérée. Les histogrammes représentent les hauteurs des précipitations journalières.

*Soil water content evolution on degraded vertisols in 1990, between 0 and 50 cm depth, 50 and 100 cm depth, for the different treatments: gridworks of small ditches (—), microcatchment (—), and control (---)*

Entre 0 et 50 cm de profondeur, les réserves hydriques sont significativement différentes entre les trois traitements sur une période allant de la première décade de juillet à la troisième décade du mois de novembre.

Sur l'ensemble du profil mesuré (0-100 cm), les résultats sont identiques. La réserve en eau totale ne varie pra-

tiquement pas sur le témoin (150 mm). Les maxima atteints sur les aménagements en casiers et microcatchment sont respectivement de 341 mm et 295 mm, et entre ces traitements, pour la même période que précédemment, les moyennes sont significativement différentes (tabl. II).

TABLEAU II

Réserves hydriques totales et disponibles pour les différents aménagements testés sur vertisols dégradés.

Les mesures concernent l'horizon 0-100 cm et la période allant de mai 1990 à janvier 1991

*Soil-water content and availability for different practices tested on degraded vertisols. The data concern the soil volume between 0 and 100 cm depth, during the period between May, 1990 and January, 1991*

Aménagement	Réserves hydriques totales maximales (mm)	Cumul des réserves hydriques journalières (témoin = 100)	Durée de présence des réserves hydriques disponibles (mois)
Casiers	341	137	4,7
Microcatchment	295	119	3,7
Témoin	213	100	0

Les casiers stockent donc davantage d'eau, essentiellement au niveau des cinquante premiers centimètres, et conservent des disponibilités pour le végétal sur une période plus longue. À partir de la mi-novembre, les différences de réserve n'apparaissent plus entre les différents aménagements. Pendant la saison sèche, les parcelles aménagées en casiers sont les seules à avoir présenté une augmentation du nombre de fentes de retrait apparaissant à la surface du sol.

Les observations sur le comportement agronomique du sorgho repiqué de contre-saison ont montré pour les deux

années des différences nettes entre, d'une part, les casiers et, d'autre part, le microcatchment et le témoin. Les résultats sur la vitesse de croissance et la production de biomasse aérienne consignés dans le tableau III le confirment. La croissance fut non seulement plus importante mais également beaucoup plus homogène sur l'ensemble des parcelles expérimentales aménagées en casiers. De même, la reprise des plants, après repiquage, fut nettement plus difficile avec le microcatchment et le témoin, où l'on a relevé des pertes à la reprise de l'ordre de 60 à 90 %, alors que celles-ci se situaient entre 40 et 45 % sur les casiers.

TABLEAU III

Comparaison de la quantité de matière sèche produite et de la vitesse de croissance du sorgho de contre-saison en fonction des différents aménagements sur vertisols dégradés (les blocs 1 et 2 correspondent au deux répétitions dans le dispositif expérimental)

*Comparison of dry matter production and growth rate of post-rainy sorghum for different practices tested on degraded vertisols (« bloc 1 » and « bloc 2 » correspond with the two repetitions in the experimental plan)*

Aménagement	Bloc	Matière sèche (t/ha)		Croissance (m/j)	
		1989	1990	1989	1990
Casiers	1	2,3	1,3	1,9	1,2
	2	1,5	1,3	1,3	1,9
Microcatchment	1	1,5	0,4	0,7	0,5
	2	1,1	0,7	0,6	0,6
Témoin	1	1,4	0,6	1,0	0,3
	2	1,2	0,4	1,8	0,4

### Modélisation du bilan hydrique des vertisols dégradés

À partir de l'ensemble de ces observations, il a été possible de définir et d'établir un modèle de fonctionnement hydrique des vertisols dégradés. La modélisation est un excellent outil de structuration de l'ensemble des observations réalisées. Elle nous permet ainsi de dégager les points primordiaux du fonctionnement hydrique des sols dégradés qui nous concernent. Par ailleurs, la modélisation peut servir à une simulation d'une variation des conditions de pluviosité ou d'aménagement.

Le modèle de bilan hydrique de type déterministe, développé initialement par FRANQUIN et FOREST (1977), a l'avantage de fonctionner à partir de données agromatologiques simples. Le principe est basé sur la comptabilisation des gains et des pertes en eau d'un système eau-sol-plante (équation 1) :

$$\Delta S = P - R - D - ETR \quad (1)$$

—  $\Delta S$  représente la variation de réserve hydrique totale pour un réservoir sol considéré ;

—  $P$  constitue l'apport en eau par les précipitations ;

— les pertes en eau sont constituées par  $R$  le ruissellement à la surface du sol,  $D$  le drainage au-delà des limites du réservoir considéré et  $ETR$  l'évapotranspiration réelle.

À partir des connaissances acquises sur le fonctionnement des vertisols, nous avons proposé un schéma hypothétique du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés définissant les différents termes du bilan hydrique.

Au début de la saison des pluies, quatre phases dans l'évolution des réserves hydriques sont considérées :

— une phase d'humectation du profil : les hauteurs de pluie, qui ont échappé au ruissellement, présentent, à travers la macroporosité fissurale, une pleine efficacité dans la recharge hydrique du profil ; le sol est nu, et l'évaporation directe à partir du sol est très faible voire nulle ;

— une phase de saturation hydrique : le gonflement des argiles provoque la fermeture de la macroporosité, l'infiltration de l'eau est alors très lente ; les pertes par évaporation, à partir de stagnations d'eau libre, sont très importantes, proches de la demande évaporative ;

— une phase de dessèchement : elle débute avec le ralentissement de la fréquence des pluies puis l'arrêt total des précipitations ; l'évapotranspiration réelle diminue fortement en fonction de la diminution des réserves hydriques disponibles dans le sol ;

— une phase de dessèchement total : la végétation est absente et les réserves en eau disponibles inexistantes, l'évapotranspiration réelle est donc très faible voire négligeable.

Dans ce schéma apparaissent deux seuils limitants. Le premier,  $Lhs$ , correspond à une limite entre la phase d'hu-

mectation et la phase de saturation hydrique, qui peut donc être atteinte lorsque la quantité d'eau présente dans le sol est nécessaire et suffisante pour provoquer la fermeture du réseau fissural. Le second,  $Lsd$ , correspondant au début de la phase de dessèchement, est fonction du ralentissement des pluies, la limite pouvant être caractérisée par une pluviosité minimale pendant la période de simulation considérée.

Sur la base de nos résultats expérimentaux, nous avons simplifié l'estimation des divers paramètres de ce schéma et évité ainsi des ajustements successifs trop nombreux qui nous auraient éloignés d'un modèle réellement explicatif (MASSE, 1992).

Par conséquent, nous considérons que (tabl. IV) :

— la limite  $Lhs$  est atteinte lorsque la réserve hydrique totale s'est accrue de 80 % par rapport à la réserve hydrique du début de saison des pluies ;

— la limite  $Lsd$  correspond à des précipitations inférieures à 20 mm au cours de deux décades successives ;

— l' $ETR$ , négligeable pendant la phase d'humectation en raison de l'infiltration par les fissures, devient égale à l' $ETP$  Penman pendant la phase de saturation hydrique ;

— pour la phase de dessèchement du profil, l'observation de l'évolution de la réserve hydrique totale est traduite par une loi exponentielle de décroissance.

La figure 6 représente, suivant un pas de temps décadaire, la courbe d'évolution des réserves hydriques calculées par le modèle dans les conditions d'une parcelle cultivée, en 1989, en sorgho de saison des pluies, sans aucun aménagement spécifique. La comparaison graphique entre les valeurs mesurées et estimées montre que le modèle et les hypothèses émises à sa construction sont satisfaisants (MASSE, 1992).

À partir de ce modèle, il est possible d'étudier l'influence de conditions pluviales différentes. La figure 7 reprend l'exemple précédent mais en simulant une sécheresse en cours de saison des pluies pendant les mois de juillet et août. La baisse des réserves hydriques totales est effective pendant la période de sécheresse ; en revanche, une baisse des pluies de 20 % en juillet et en août induit paradoxalement une augmentation des réserves hydriques pendant le mois de septembre, période qui correspond, en général, à la floraison. Les mêmes observations apparaissent avec une baisse de 80 % des pluies. Ces phénomènes s'expliqueraient par la « réouverture » du réseau fissural, provoquée par une baisse des teneurs en eau en cas de sécheresse. On a alors une capacité accrue de mise en réserve de l'eau dans le sol. Le modèle prend en compte ce phénomène par l'intermédiaire du seuil  $Lhs$ , qui délimite la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique.

TABLEAU IV  
Description du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés, et évolution  
des différents termes du bilan hydrique au cours du temps  
*Description of the soil water regime of the degraded vertisols  
and evolution of the soil water balance parameters*

Bilan hydrique	phase d'humectation	phase de saturation hydrique	phase de dessèchement	phase de dessèchement total
Réserve hydrique totale 0-100 cm	Lhs		Lsd	.
Evapotranspiration Réelle	ETR = Kh ETP Kh faible	ETR = Ks ETP Ks élevé	ETR = ETP [ 1 - e <sup>-α(So - Si)</sup> ]	
Ruissellement	Lr = 0,541 P - 0,103 CV + 0,075		-	-
Drainage	négligeable			
Pluviosité	.			

Lhs : Seuil limite entre la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique Lsd : Seuil limite entre la phase de saturation hydrique et la phase de dessèchement So : Réserve hydrique totale en fin de saison sèche Si : Réserve hydrique totale au jour i Lr : Lamme ruisselée en mm P : Hauteurs précipitées en mm CV : indice de couvert végétal

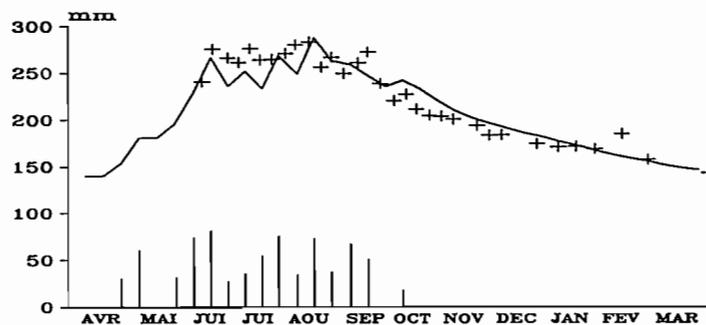


FIG. 6. — Estimation de l'évolution des réserves en eau du sol de l'horizon 0-100 cm (—), sur un vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies sans aménagement, au cours de la saison 1989-1990. Les points (+) représentent les valeurs mesurées sur le terrain.

*Estimation of the soil water content between 0 and 100 cm depth (—), on degraded vertisol, cultivated with rainy season sorghum, without specific management, for the 1989-1990 rainy season. The points (+) represent the experimental field data.*

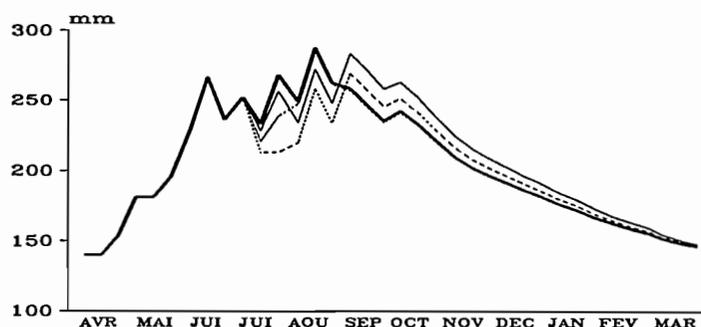


FIG. 7. — Simulation de l'évolution de la réserve hydrique totale de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies (—), avec des hauteurs précipitées pour les deuxième et troisième décades de juillet et la première décade d'août inférieures de 20 % (---), 50 % (...) et 80 % (-.-) par rapport à celles de l'année 1989.

*Simulation of the soil water content between 0 and 100 cm depth, for a rainy season sorghum cultivation (—), with a rainfall amount decreased by 20% (---), 50% (...), and 80% (-.-) for the 3 ten-day periods of July, 10 to August, 10 in comparison of the same period in 1989-1990 season.*

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans le cadre de travaux sur la réhabilitation des vertisols dégradés, l'amélioration du régime hydrique apparaît primordiale. Les petits aménagements hydroagricoles testés sur les faciès les plus dégradés, encore appelés sols hardés, n'ont pas donné de résultats très nets concernant les quantités d'eau stockées. En revanche, dans le cas de vertisols présentant encore des fentes de retrait en début de saison sèche, l'humectation en profondeur est assurée et augmentée par des traitements qui concentrent au maximum l'eau ; les pratiques les plus appropriées semblent être alors les aménagements de type « casiers » qui captent entièrement les hauteurs précipitées grâce à un carroyage serré de diguettes. La modélisation a fait apparaître l'importance des fentes de retrait en prenant en considération un seuil de fermeture et d'ouverture du réseau fissural. Celui-ci détermine l'ampleur de l'humectation du sol en début de saison des pluies ainsi que la capacité à tamponner l'effet d'une sécheresse relative durant la saison des pluies. Il semble que les phénomènes de dégradation induisent non seulement la présence d'une épaisse croûte de battance, qui crée un obstacle à l'infiltration de l'eau, mais également une modification des comportements dans les horizons sous-jacents, avec notamment la réduction voire la disparition de la macroporosité fissurale.

Les principes d'une amélioration du régime hydrique en vue de la réhabilitation des vertisols dégradés doivent donc s'attacher plus spécifiquement aux causes liées à la disparition de cette macroporosité fissurale.

Les phénomènes de retrait et de gonflement des argiles sont, selon WILDING et TESSIER (1988), en étroite relation non seulement avec des propriétés intrinsèques des vertisols, mais également avec des caractéristiques environnementales. Ces phénomènes sont liés, d'après ces auteurs,

d'une part aux caractéristiques minéralogiques, chimiques et structurales des argiles présentes, d'autre part au climat et à l'histoire des stress d'origine climatique, à la topographie, à la végétation ainsi qu'aux systèmes de culture pratiqués sur ces sols.

TESSIER (1990) a montré que l'organisation interne des argiles, à tous les niveaux d'unité structurale, joue un rôle majeur dans les rapports de ces matériaux vis-à-vis de l'eau. Cette micro-organisation dépend non seulement des caractéristiques minéralogiques de la phase solide, mais aussi des propriétés de la solution de contact (PEDRO, 1987). Ainsi, d'après les travaux de TESSIER *et al.* (1980), les argiles de type smectite-Ca subissent des modifications de structure après une forte dessiccation, qui ont pour effet de diminuer les capacités de rétention en eau de ces argiles au cours d'une nouvelle phase d'humectation. Le dessèchement agirait ainsi de manière partiellement irréversible en agrégeant les particules originelles des matériaux argileux hydratés. Les méthodes récentes de rétractométrie établies par BRAUDEAU (1988), accompagnées d'une étude minéralogique approfondie des vertisols dégradés du bassin versant de Mouda, devraient permettre de répondre à ces questions sur l'état physico-chimique des argiles concernées dans ces sols.

Sur les sols hardés, après deux années d'expérimentation, la réacquisition d'un réseau fissural perdu pendant la phase de dégradation ne semble pas effective ; l'observation des horizons supérieurs n'a pas révélé de fissuration très nette en saison sèche. Les variations de teneur en eau obtenues par humectation ne sont pas suffisantes pour créer les mouvements de retrait et de gonflement, responsables de la présence d'une macroporosité fissurale dans les matériaux vertiques. Les stagnations d'eau en surface tant sur le « pitting » que sur les traitements « microcatchment » et « bandes alternées » en sont la démonstration.

Sur les vertisols moins dégradés, le fonctionnement durable de la macroporosité fissurale est assuré par des barrières imperméables à l'écoulement ; celles-ci maintiennent une charge hydraulique élevée dans les fentes de retrait, ce qui favorise l'humectation maximale et les mouvements de retrait et de gonflement des argiles. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus sur des sols à texture grossière, pour lesquels les aménagements de type filtrant sont les plus efficaces pour la gestion de l'eau et la conservation des sols (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1990 ; ROOSE, 1990 b ; ROOSE et RODRIGUEZ, 1990).

Les prochains travaux devront également considérer d'autres aspects pouvant favoriser l'humectation des sols les plus dégradés. Ils concernent essentiellement l'amélioration du statut organique et de la porosité biologique. Sur ce dernier point, SEINY BOUKAR (1990) indique que les

foyers de réactivation biologique du sol proviennent le plus souvent des ligneux. L'arbre, par l'action de son système racinaire, joue un rôle dans l'amélioration de la porosité biologique, favorisant ainsi l'humectation des horizons plus profonds (GROUZIS *et al.*, 1991). Des essais de réhabilitation de sols dégradés, menés par le Centre de recherche forestière de Maroua, ont effectivement montré l'efficacité de l'association arbre-diguette pour l'humectation en profondeur de sols extrêmement compacts de type planosols (EYOG MATIG, 1989). Les techniques d'agroforesterie (ROOSE, 1990 b ; FELLER *et al.*, 1993), notamment la jachère arborée améliorée (PELTIER, 1989), associées à des pratiques de conservation de l'eau, seraient ainsi, à l'heure actuelle, les méthodes les plus appropriées pour la réhabilitation des vertisols dégradés du Nord-Cameroun.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN (M. F.), 1988 — « Below-ground structure : a key to reconstructing a productive arid ecosystem ». In Allen (E. A.), éd. : *The reconstruction of disturbed arid lands: an ecological approach*, Boulder, CO, Westview Press : 113-135.
- ARONSON (J.), FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), OVALLE (C.), PONTANIER (R.), 1993 — Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems of arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1 (1) : 8-17.
- BOLI (Z.), BEP A ZIEM (B.), ROOSE (E.), 1991 — Enquête sur l'érosion pluviale sous rotation intensive coton-céréale dans la région de Tcholliré (Sud-Est-Bénoué, Nord-Cameroun). *Bull. Réseau Érosion*, 11 : 127-138.
- BRABANT (P.), GAUVAUD (M.), 1985 — *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun (Provinces du Nord et de l'Extrême-Nord). Cartes à 1/500 000*. Paris, Orstom, coll. Notices explicatives, 103, 286 p.
- BRADSHAW (A. D.), 1987 — « Restoration: an acid test for ecology ». In Jordan (W. R.), Gilpin (M. E.), Aber (J. D.), éd. : *Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research*, Cambridge, Cambridge University Press : 23-29.
- BRAUDEAU (E.), 1988 — Méthode de caractérisation pédohydraulique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 24 (3) : 179-189.
- CEE, 1988 — *Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final*. Contrat TSD A-216-CAM (DG12-CEE), Mesres-Orstom-CNRS.
- DONFACK (P.), 1992 — *Étude de la dynamique de la végétation après abandon cultural au Nord-Cameroun*. Thèse doct. 3<sup>e</sup> cycle, univ. Yaoundé.
- DUDAL (R.), 1965 — Dark clay soils of tropical and subtropical regions. Rome, FAO, *Agricultural Development paper*, 83.
- ECKEBIL (J.-P.), BARRAULT (J.), VAILLE (J.), 1972 — Point des travaux de l'IRAT sur les sorghos repiqués du Nord-Cameroun. *Agron. Trop.*, 27 (8) : 791-814.
- EYOG MATIG (O.), 1989 — « Quelques tentatives de récupération des sols stériles. Plantations forestières dans le Nord-Cameroun ». In : *Proceedings of a regional seminar on Trees for development in Sub-Saharan Africa*, IFS (International Foundation for Science), february 20-25, 1989, Nairobi, Kenya.
- FELLER (C.), LAVELLE (P.), ALBRECHT (A.), 1993 — « La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion ». In : *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires, 494 p.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1982 — *L'aridité en Tunisie pré-saharienne*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 150, 544 p.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1984 — Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 131, *Actual. bot.* (2-3-4) : 265-275.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), SEINY BOUKAR (L.), 1991 — Plant-Soil-Water relationships in a sahelo-soudanian savannah : the case of Northern Cameroon vertisols. *Can. J. Soil Sci.* (à paraître).
- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977 — Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32 (1) : 7-11.
- GAUVAUD (M.), 1971 — Les sols « hardés » du Nord-Cameroun (sols halomorphes, sols lessivés, planosols, sols hydromorphes). Mise au point bibliographique. *Bull. Liaison*, thème B, 2 (Paris, Orstom) : 55-88.
- GROUZIS (M.), NIZINSKI (J.), AKPO (E.), 1991 — « L'arbre et l'herbe au Sahel. Influence de l'arbre sur la structure spécifique, la production de la strate herbacée et la régénération des espèces ligneuses ». In : *IV<sup>e</sup> Congrès international des terres de parcours*, 22-26 avril 1991, Montpellier, France, 11 p.
- IRA-CNS, 1989 — *Réhabilitation et utilisation de terres marginales du Nord-Cameroun. Rapport de campagne 1989*.

- Projet CEE/Mesres/Ira/CNRS/Orstom TS 2A/0077/M(CD), 58 p.
- LAMACHÈRE (J.-M.), SERPANTIÉ (G.), 1990 — « Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi ». In Kergrais (A.), Claude (J.), éd. : *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*. Journées scientifiques du réseau « Génie Para-Sécheresse » de l'Uref, Ouagadougou, 12-15 mars 1990, Paris, John Libbey Eurotext : 165-178.
- MASSE (D.), 1992 — *Amélioration du régime hydrique des sols dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord-Cameroun*. Thèse doct.-ing., INP, Toulouse, 187 p.
- MITCHELL (A. J. B.), 1987 — « Management problems of cotton on vertisols in the lower shire valley of Malawi ». In Latham (M.), Ahn (P.), Elliott (C. R.), éd. : *Management of vertisols under semi-arid conditions*, Bangkok, Ibsram, Proceedings, 6 : 221-229.
- OLIVRY (J.-C.), 1986 — *Fleuves et rivières du Cameroun*. Paris, Orstom, coll. Monographies hydrologiques, 9, 734 p.
- PEDRO (G.), 1987 — Géochimie, minéralogie et organisation des sols : aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 23 (3) : 169-186.
- PELTIER (R.), 1989 — *Les essais d'agroforesterie au Nord-Cameroun*. Nogent-sur-Marne, CTFT, Yaoundé, IRA, 42 p.
- PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEINY BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1984 — *Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun soumis à des averses contrôlées*. Yaoundé, Mesres-IRA-IRGM, 71 p.
- PONTANIER (R.), THEBE (B.), 1989 — Étude du ruissellement au Nord-Cameroun, transfert de la parcelle au bassin versant. *Hydrol. Continent.*, 4 (1) : 57-69.
- ROOSE (E.), 1990 a — *Dégradation, érosion et restauration des sols sous culture intensive dans la zone cotonnière du Nord-Cameroun*. Rapport de mission, Cirad-IRA-Orstom, 20 p.
- ROOSE (E.), 1990 b — Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne. Définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. *Bull. Réseau Érosion*, 10 : 98-107.
- ROOSE (E.), 1992 — « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols. Influence du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale ». In Le Flo'h (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.
- ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.), 1990 — *Aménagement de terroirs au Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso). Quatre années de GCES. Bilan et perspectives*. Ouahigouya, CRPA, Montpellier, Orstom, 40 p.
- SEINY BOUKAR (L.), 1990 — *Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun*. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, univ. Yaoundé, 226 p.
- SEGHIERI (J.), 1990 — *Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-Cameroun*. Thèse doct., USTL, Montpellier, 200 p.
- SERPANTIÉ (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.), VALENTIN (C.), 1992 — « La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions ». In Le Flo'h (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 419-448.
- TESSIER (D.), 1990 — « Behaviour and microstructure of clay minerals ». In De Boodt (M.), Hayes (M.), Herbillon (A.), éd. : *Soil colloids and their associations in aggregates*, New York, Plenum Press : 387-415.
- TESSIER (D.), CAMARA (L.), PEDRO (G.), 1980 — Sur le comportement hydrique et l'évolution des organisations des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sciences*, Paris, 290, D : 1169-1172.
- THEBE (B.), 1987 — *Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles*. Thèse doct., USTL, Montpellier, 306 p.
- VAILLE (J.), 1970 — Essais de mise en valeur des sols « hardés » du Nord-Cameroun. *Agron. Trop.*, 25 (5) : 472-490.
- WILDING (L. P.), TESSIER (D.), 1988 — « Genesis of vertisols: shrink-swell phenoma ». In Wilding (L. P.), Puentes (R.), éd. : *Vertisols : their distribution, properties, classification, and management*, Texas A & M University Printing Center, College Station : 55-81.