

Influence de l'aménagement des sols sur l'efficacité des pluies au Nord-Cameroun

F. Mahop (1), E. Van Ranst (1) et Seiny Boukar (2)

1. Université de Gand, Laboratoire de Pédologie, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gand, Belgique.

2. Centre de Recherche Agronomique de Maroua, IRA, B.P. 33, Maroua, Cameroun.

RÉSUMÉ

L'efficacité de l'infiltration des pluies est analysée à l'échelle de 1 m² sous pluie naturelle et simulée. Les sols étudiés, localisés dans le bassin versant de Mouda, sont représentatifs du Nord Cameroun et appartiennent à deux catégories : (1) les sols de la série verticale à pente douce (1 à 3 %) comportent une gamme variée de sols. Ces sols, constitués de Vertisols Modaux (VM) et Dégradés (VD), et l'essentiel des sols "hardés" (HV), se sont développés sur des matériaux argileux des grandes plaines d'inondation et des glacis d'épandage ; et (2) les sols ferrugineux différenciés (SF), situés sur des plateaux dont l'altitude varie entre 450 à 500 m. Ces sols, parfois indurés et à charge caillouteuse importante, sont souvent sous jachère ou cultivés en sorgho, arachide et coton à rendement faible en culture traditionnelle.

Les intensités des pluies simulées sont choisies de manière à se rapprocher le plus possible des averses naturelles caractéristiques de la région. Outre l'influence de l'état d'humidité sur la capacité d'infiltration du sol, deux méthodes d'amélioration de la recharge des réserves hydriques, l'une par paillage, l'autre par amendement gypseux, sont également testées.

Les coefficients d'infiltration des pluies varient avec les types de sols, et constituent un excellent moyen d'estimation de la pluie effective dans le calcul des réserves en eau du sol. D'une manière générale, le comportement des sols de la séquence verticale est variable et présente un gradient net qui semble être en relation avec leur niveau de dégradation. On observe une décroissance importante des coefficients K_i de la première à la troisième pluie d'une part, et des VM aux HV d'autre part. Les Vertisols Modaux (K_i moyen = 82,0 %) infiltrent trois fois plus que les sols "hardés" ($K_i = 27,1$ %). Les Vertisols Dégradés présentent des coefficients intermédiaires (K_i moyen = 36,3 %), mais plus proches des sols "hardés".

Sur les sols ferrugineux, le coefficient moyen d'infiltration sous pluies naturelles et simulées est supérieur à 50 %.

Le paillage à 2,5 kg m² améliore considérablement l'infiltration des eaux pluviales sur tous les types de sols. L'action du gypse bien que moins spectaculaire semble être plus bénéfique sur les sols ferrugineux.

Mots clés

Infiltration - réserve en eau du sol - aménagement des sols - Nord Cameroun.

SUMMARY**INFLUENCE OF SOIL MANAGEMENT ON RAINFALL EFFECTIVENESS IN NORTH CAMEROON.**

The efficiency of rainfall infiltration is analyzed with simulated precipitation and natural rainfall on a parcel of 1 m². The studied soils, located in the watershed of Mouda, are representative for northern Cameroon and belong to two groups : (1) soils with vertic properties on very gentle to gentle slopes (1 to 3 %), comprising different soils types. These soils, typic vertisols (VM), degraded vertisols (VD) and most of "hardés" soils (HV) have been developed on clayey materials of the extensive flood plains and on flood pediments ; and (2) differentiated ferruginous soils (SF), situated on plateaus with altitude between 450 and 500 m. These soils, sometimes indurated and very gravelly, are often under fallow or cultivated with sorghum, groundnuts and cotton. Yields are low under traditional farming.

The intensities of simulated precipitation are selected in such a way that they imitate as much as possible the characteristics of the natural rain showers of the region. Besides the influence of humidity status on the infiltration capacity of the soil, two methods to improve recharging of soil moisture reserves have been tested : gypsum application and straw covering.

The rainfall infiltration coefficients (Ki) vary according to soil type and constitute an excellent tool to estimate effective rainfall during the calculation of soil moisture reserves. In general, the behaviour of the soils of the vertic sequence is variable and appears to present a net gradient in relation to the level of degradation. A gradual decrease of the Ki coefficients is observed from the first until the last rainfall event on the one hand and from VM to HV soils on the other hand. VM soils (average Ki = 82.0 %) infiltrate 3 times more water than HV soils (average Ki = 27.1 %). VD soils present intermediate coefficients (average Ki = 36.3 %), approaching the values of HV soils.

On ferruginous soils the infiltration coefficients under natural and simulated rainfall exceed 50 %.

An application of 2.5 kg straw per m² considerably improved rainfall water infiltration. The effect of gypsum application is less spectacular, but seems to be more efficient on ferruginous soils.

Key-words

Rainfall infiltration - soil moisture reserve - soil management - North Cameroon.

RESUMEN**INFLUENCIA DEL MANEJO DE SUELOS SOBRE LA EFICACIA DE LLUVIAS EN EL NORTE DE CAMERÚN**

La eficacia de la infiltración de las lluvias se analizó a la escala de 1m² bajo lluvia natural y simulada. Los suelos estudiados, localizados en la cuenca hidrológica de Mouda, están representativos del norte de Camerún y pertenecen a dos categorías : (1) los suelos de la serie vértica en pendiente ligera (1 - 3 %) presentan una gama variable de suelos. Estos suelos, constituidos de vertisoles modales (VM) y degradados (VD), y la mayoría de los suelos "hardés" (HV), se desarrollaron sobre materiales arcillosos de las grandes planicies de inundación y de los "glacis de derrame" ; y (2) los suelos ferruginosos diferenciados (SF), localizados en las mesetas cuyas el altitud varia entre 450 y 500 m. Estos suelos, a veces, indurados y con carga pedregosa importante, están en barbecho o cultivados en sorgo, maní, algodón, con rendimiento bajo en cultivo tradicional.

Las intensidades de las lluvias simuladas están elegidas de manera a acercarse lo más posible de los aguaceros naturales característicos de la región. Además de la influencia del estado de humedad sobre la capacidad de infiltración del suelo, dos métodos de mejoramiento de la recarga de las reservas hídricas, una con capa de paja, otra con abono yesoso, se probaron.

Los coeficientes de infiltración de las lluvias varían con los tipos de suelos, y constituyen un excelente medio de estimación de las lluvias efectivas en el cálculo de las reservas en agua del suelo. De una manera general, el comportamiento de los suelos de la secuencia vértica es variable y presenta un gradiente neto que parece ser en relación con su nivel de degradación. Se observa un decrecimiento importante de los coeficientes Ki desde la primera a la tercera lluvia de una parte, y de los VM a los HV de otra parte. Los vertisoles modales (Ki promedio = 82,0 %) infiltran pres veces más que los suelos "hardés" (Ki promedio = 27,1 %). Los vertisoles degradados presentan coeficientes intermediarios (Ki promedio = 36,3 %), pero más cerca de los suelos "hardés". Sobre los suelos ferruginosos, el coeficiente promedio de infiltración bajo lluvias naturales y simuladas está superior a 50 %.

La capa de paja con 2,5 kg/m² mejora considerablemente la infiltración de las aguas de lluvia para todos tipos de suelos. La acción del yeso aunque menos espectacular parece ser más benéfica sobre estos suelos ferruginosos.

Palabras claves

Reserva en agua del suelo - orde nación de los suelos - Norte de Camerún.

L'agriculture nord-camerounaise est confrontée à la rigueur du milieu physique liée principalement au climat tropical contrasté.

Si les différences de températures d'une année à l'autre sont peu sensibles et de toute façon, de faible influence sur les activités rurales, il en va tout autrement de la pluviométrie. Malgré l'alternance régulière des saisons pluvieuses et sèches, les variations interannuelles et les anomalies de répartition saisonnière apparaissent comme des facteurs déterminants de l'évolution des productions agricoles et pastorales. C'est ainsi, que de nombreuses cultures ne disposant pas de temps suffisant pour parfaire leur cycle et obtenir de bonnes récoltes, on est contraint d'avancer le plus possible la date de semis dans la période encore incertaine des premières pluies. La grande variabilité des sols et les pratiques culturales paysannes accentuent ou diminuent localement les besoins en eau des plantes. C'est dans ce contexte de déséquilibre hydrique que certains sols représentatifs du Nord Cameroun ont été étudiés à l'échelle de un mètre carré sous pluie naturelle et sous pluie simulée. Cette étude a été conduite pour caractériser et quantifier le ruissellement et l'infiltration et apprécier la sensibilité de ces milieux à l'érosion hydrique.

Pour améliorer l'infiltration, facteur important dans la recharge des réserves hydriques du sol, deux types d'aménagement, l'un par paillage et l'autre par amendement gypseux, sont testés sur les sols de la série vertique et sur les sols ferrugineux en vue d'une réflexion sur les actions d'aménagement à entreprendre pour une meilleure gestion de l'espace rurale.

LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA ZONE ÉTUDIÉE

La zone étudiée est située au S.O. de Maroua, entre le 10^{ème} et le 11^{ème} degré de latitude nord (figure 1).

Elle est bordée à l'ouest par la chaîne des Monts Mandara qui constituent la frontière naturelle avec le Nigeria. La partie camerounaise de la chaîne s'étale sur 50 km de large en moyenne, et culmine à 1 500 m au nord de Mokolo. C'est de cet ensemble de montagnes et de plateaux granitiques, avec des intrusions de basalte et de trachyte, que naissent les cours d'eau qui drainent la région.

Les zones de piedmont sont constituées de pédiments développés sur roches dures correspondant à des gneiss granitisés ou à des granites, et de glacis qui résultent de l'accumulation uniforme des matériaux grossiers d'origine arénique dont l'épaisseur est variable (Humbel et Barbery, 1974).

Les plaines s'étendent entre les zones de piedmont des Mandara et le cordon dunaire qui marque le paléo-Tchad. La plaine du Diamaré qui abrite le principal site de l'étude, le bassin versant de Mouda, est une plaine d'accumulation de dépôts

récents recouvrant une ancienne pénéplaine façonnée dans les roches métamorphiques et éruptives. Quelques inselbergs émergent de cet ensemble. Le bassin versant de Mouda, situé au sud de Maroua, à 30 km sur la route de Garoua (figure 1) a une superficie de 18,1 km² et équivaut à un rectangle de 6,6 km de long sur 2,74 km de large.

Le climat général est de type soudano-sahélien (Suchel, 1972) avec une évapotranspiration potentielle calculée de 2 193 mm pour une pluviométrie annuelle moyenne de 800 mm (moyenne de 31 ans) et une saison sèche qui dure 7 mois environ dont 5 ont une pluviométrie nulle. Les mois de juillet et août concentrent plus de 55 % des pluies de la saison. Les premières pluies apparaissent généralement au cours de la dernière décennie d'avril. Elles s'intensifient progressivement en mai et juin. De la troisième décennie de juin à la première décennie de juillet, une courte saison sèche de 10 à 15 jours peut s'installer, puis arrivent les pluies fréquentes et abondantes de la fin juillet souvent assez fortes ; le maximum des précipitations est atteint au cours des deux dernières décennies d'août. Dès septembre, les pluies décroissent pour s'arrêter pratiquement avec la deuxième décennie d'octobre. Les moyennes mensuelles (période 1961-1992) des précipitations et de l'évapotranspiration selon Penmann Monteith (Smith, 1991) de la station de Maroua sont consignées dans la figure 2.

Le bassin versant de Mouda présente une végétation ligneuse relativement diversifiée et une végétation herbacée constituée de graminées annuelles. Il se caractérise également par une absence des herbacées pérennes (Donfack, 1988). La végétation naturelle est fortement anthropisée. On y rencontre des steppes arbustives à *Balantines aegyptiana* ; des boisements à *Anogeissus leiocarpus* ; des jachères sahéliennes à *Combretum glutinosum* ; des jachères sahélo-soudaniennes à *Acacia hockii*, *Acacia seyal* et *Pennisetum pedicellatum* ; des steppes arbustives soudano-sahéliennes dont la plupart sont sur les sols hardés.

Les conditions climatiques et édaphiques, l'histoire et la croissance démographique interviennent pour déterminer les modes d'occupation de l'espace. L'accroissement naturel de la population et les migrations ont entraîné une augmentation importante des densités entre 1976 et 1987. Il en est ainsi de la région de Maroua qui a vu sa densité de population passer de 64,6 habitants au km² en 1976, à 82,9 habitants au km² en 1987 (PNUD-UNSO, 1993). Ces densités élevées sont à l'origine des déplacements de population des zones fortement peuplées, vers les zones moins occupées. Les migrations tendent à délester les montagnes surpeuplées (peuples animistes réfractaires à l'Islam), au "profit" des plaines (musulmans qui se sont installés dans les plaines le siècle dernier).

L'analyse des systèmes de production repose sur l'utilisation de l'eau, les autres activités liées à l'agriculture et l'évolution des recherches dans ce domaine. La culture pluviale est la forme la plus fréquente de l'utilisation des terres. Les

Figure 1 - Localisation de la zone d'étude.

Figure 1 - Location of the study area.

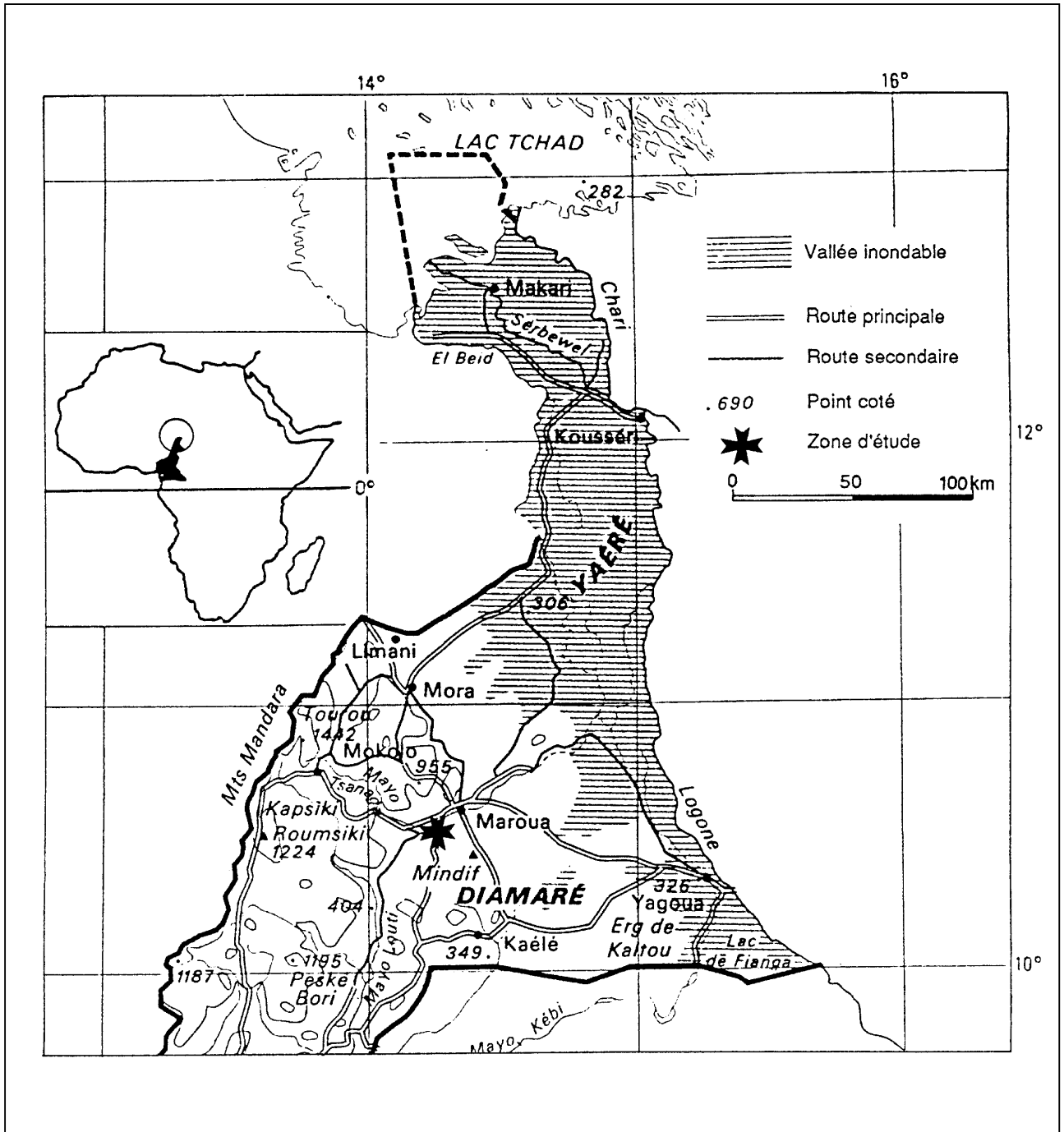
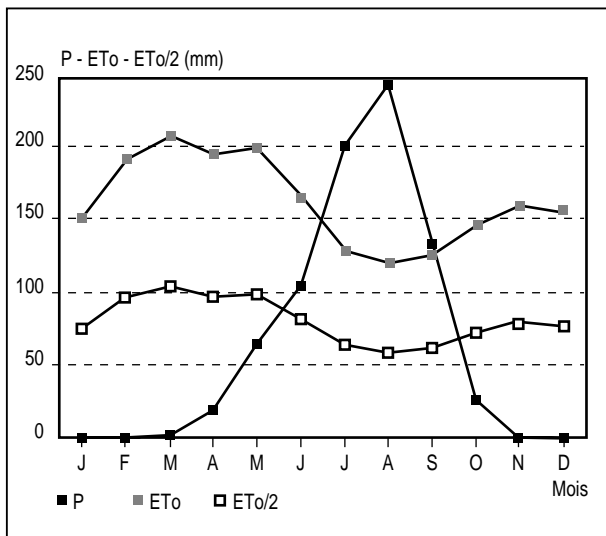


Figure 2 - Précipitation et évapotranspiration de référence à Maroua (période : 1961-1992).

Figure 2 - Rainfall and reference evapotranspiration at Maroua (périod : 1961-1992).



principales cultures vivrières (mil, sorgho, maïs, arachide, niébé et légumes divers) sont semées vers fin mai et sont récoltées durant les mois de septembre et octobre. Le système d'irrigation développé localement à l'aide des motopompes, permet le développement des cultures maraîchères et fruitières. Les cultures de décrue, et particulièrement celle du sorgho de saison sèche (mouskwari), se pratiquent en contre saison sur les vertisols. Le système pluvial moderne (utilisations des intrants agricoles) concerne surtout la culture cotonnière, à laquelle s'ajoute parfois celle du maïs, du sorgho et de l'arachide. Certains itinéraires techniques de mise en place de ces cultures, notamment la préparation du sol (motorisation) sont mécanisés et peuvent avoir des conséquences sur le ruissellement et l'érosion.

LA RÉPARTITION DES SOLS DU PÉRIMÈTRE ÉTUDIÉ

Les sols testés correspondent à différentes classes et ont été étudiés à des échelles variées dans le cadre des travaux de prospection (Martin, 1961 ; Segalen, 1962 ; Siefferman, 1963 ; Gavaud *et al.*, 1980 ; Van Ranst *et al.*, 1989 et 1990 ; Debaveye *et al.*, 1989 et 1990) ou des travaux de synthèse (Muller *et al.*, 1979 ; Embrechts *et al.*, 1979 ; Brabant *et al.*, 1985 ; Brabant, 1991 ; IRA/CIRAD/ORSTOM, 1993). Ils appartiennent à deux catégories : (1) les sols de la série verticale (Vertisols Modaux, Vertisols Dégradés, vertisols "hardisés" ou sols "hardés") ; et (2) les sols ferrugineux (*figure 3*). Leurs prin-

Figure 3 - Répartition des sols du bassin versant de Mouda.

Figure 3 - Soil distribution in watershed of Mouda.

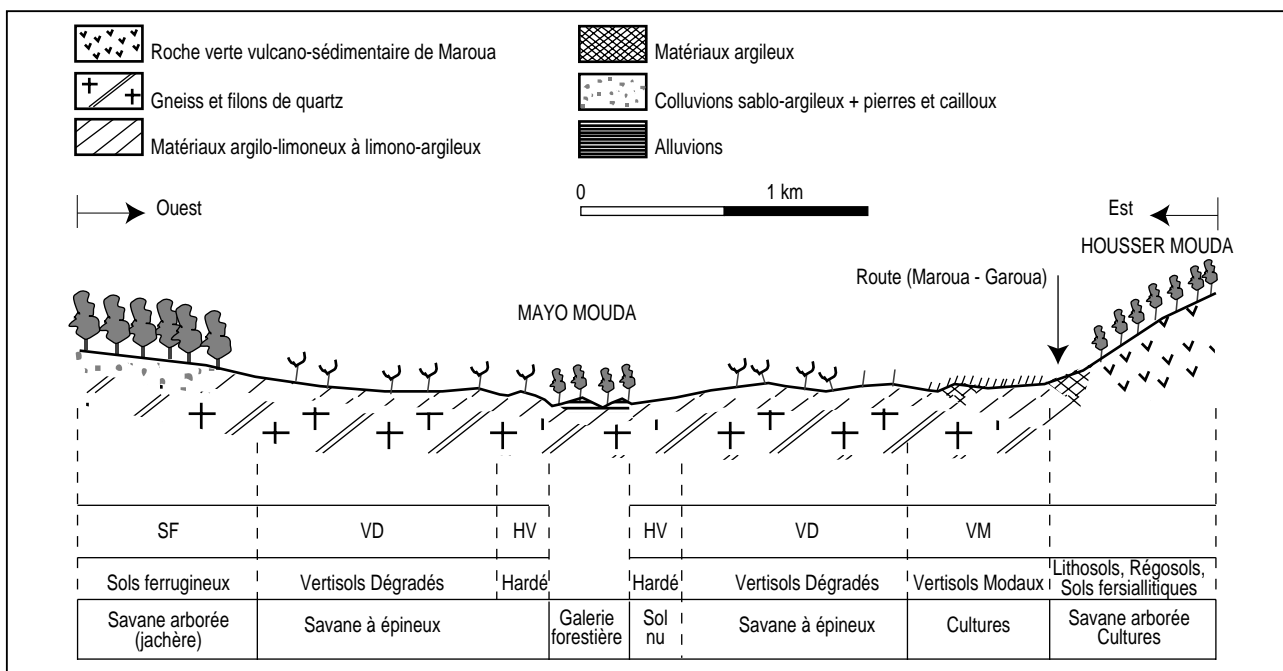


Tableau 1 - Données analytiques des sols étudiés.**Table 1** - Physico-chemical data of the studied soils.

Type de sol	Horizon cm	Granulométrie %			pH - H ₂ O (1 : 2,5)	M. O. %	Complexe d'échange*		CR** mm	da*** g cm ⁻³
		argile	limon	sable			CEC c mol (+) kg ⁻¹ sol	S		
Ferrugineux	0-30	21,0	< 15	70,0	5,8	1,6	70,0	5,5	35-50	1,4
	30-70	31		61,0	7,0	0,9	12,0	7,5		1,5
Vertisol Modal	0-40	34,4	36,9	22,1	7,0	1,5	27,5	15,0	70-80	1,7
	40-100	38,5	30,4	24,6	8,1	< 0,8		30,0		1,8
Vertisol Dégradé	0-25	29,1	< 20	51	7,8	1,1	15,0	7,5	60-70	1,6
	25-80	38,5		41	8,3	0,8		15,0		1,7
Sols "hardés"	0-40	32,6	16,0	47,2	7,0	1,1	10,0	6,0	40-50	1,5
	40-70	39,0	23,5	25,0	8,9	0,6	15,0	12,0		1,7

* (Ca + Mg + K) ; ** CR = Capacité de Rétention en eau ; *** da = masse volumique

principales caractéristiques physico-chimiques sont données dans le *tableau 1*.

Les sols de la série verticale à pente douce (1 à 3 %)

Les sols de la série verticale couvrent la plus grande partie du bassin versant de Mouda (*figure 3*). Ces sols, constitués de Vertisols Modaux (VM), et Dégradés (VD), et l'essentiel des sols "hardés" (HV) (sols stériles en langue peulh), se sont développés sur les matériaux argileux des grandes plaines d'inondation et des glaciés d'épandage. Ils sont toujours situés en aval des paysages constitués de sols ferrugineux, ou de sols fersiallitiques (*figure 3*).

Les Vertisols Modaux (VM)

Le profil verticale modal se développe sur des sites plats ou déprimés de la topographie locale. Ce sont des sols de couleur foncée en surface, recouverts parfois d'une pellicule de battance, quelquefois avec des cailloux de roche verte. A l'état sec, ils présentent des fentes de dessiccation et un micro-relief bosselé (gilgai). La porosité est faible sur tout le profil (masse volumique de l'ordre de 1,7 g cm⁻³). L'épaisseur du solum meuble varie de 80 à plus de 200 cm, et les horizons s'y distinguent par leur couleur et surtout par leur structure. L'horizon de surface, d'une épaisseur de 5 cm présente une structure massive à débit polyédrique moyen et grossier, une fine pellicule de battance de texture sableuse, des fentes de dessiccation de 1 à 1,5 cm de large. Entre 5 et 40 cm, la structure est prismatique grossière (20-30 cm) avec de nombreuses fentes verticales et subhorizontales délimitant les prismes. L'horizon compris entre 40 et 100 cm pré-

sente une structure prismatique plus grossière (40-60 cm), avec de nombreuses fentes de retrait de dimensions plus réduites. On observe des nodules calcaires épars, des faces de glissement et quelques concrétions et tâches de couleur rouille. La réserve d'eau utile pour les plantes est importante ; 70 à 80 mm pour 50 cm de profondeur.

Les Vertisols Dégradés (VD)

Ce sont des Vertisols à pédoclimat sec, présentant un faciès dégradé. Ils diffèrent des Vertisols Modaux par leur structure plus compacte surtout en profondeur, leur porosité réduite, la présence des fentes de dessiccation moins larges et une pellicule de battance plus développée. L'horizon superficiel (5 cm d'épaisseur environ) du faciès dégradé a une structure en plaquette avec un voile de sable au sommet et à la base. On observe quelques fentes de retrait. La tranche comprise entre 5 et 25 cm, représente un horizon compact à structure prismatique et à sous-structure polyédrique moyenne et grossière. On note la présence des éléments grossiers jusqu'à la taille du gravier, et une porosité interpedique faible. De 25 à 80 cm environ, la structure est prismatique grossière. On observe de nombreuses fentes verticales et subhorizontales et de nombreuses faces de glissement, des concrétions, et quelques nodules calcaires de petite taille. Au delà de 80 cm, la structure est massive et les fentes de dessiccation se raréfient. Les Vertisols Dégradés présentent généralement des croûtes pelliculaires de surface qui semblent jouer un rôle important dans l'infiltration des eaux pluviales. La réserve d'eau utile pour la végétation, inférieure à celle des Vertisols Modaux, varie entre 60 et 70 mm pour 50 cm de profondeur.

Les vertisols "hardés" ou sols "hardés" (HV)

Le vocable "hardé" est utilisé au Nord Cameroun pour désigner des étendues de terre non ou peu cultivable à très forte compacité, très peu perméable et ayant une physionomie particulière. C'est généralement un milieu inhabité, sans eau et à pauvre végétation ; les arbustes sont surtout des épineux qui alternent avec des plages dénudées claires. Des hautes termitières de couleur claire jalonnent ce paysage. Ce sont des sols présentant un faciès dégradé planosolique. Dans la plupart des cas, la surface du sol est recouverte d'une pellicule de battance. Le profil type présente un horizon A centimétrique, gris clair à tâches jaunes, sableux ou sablo-limoneux, à structure massive ou prismatique peu nette, avec quelques fentes fines. L'horizon B jaunâtre, à structure massive ou prismatique peu nette comporte des nodules et quelques fentes fines. L'érosion en nappe se manifeste par la juxtaposition de zones décapées couvertes de cailloux de quartz roussâtres, de nodules calcaires laissant en ressaut des plaques d'horizon A. La réserve d'eau utile pour la végétation varie de 40 à 50 mm pour 50 cm de profondeur.

En résumé, la dégradation des Vertisols Modaux en Vertisols "hardés" se manifeste par une perte de structure, la formation d'une croûte de battance en surface, une réduction de la perméabilité, une augmentation de la compacité, le manque d'aération, la limitation de l'enracinement. La principale conséquence de ces phénomènes est un dérèglement du régime hydrique du sol, dont le pédoclimat devient plus aride en provoquant parfois une alcalinisation. La dégradation peut survenir dans le sol par l'effet de sa propre dynamique interne, mais elle est très fortement accélérée par le défrichement et les pratiques culturales (Brabant et Gavaud, 1985). Les Vertisols Dégradés constituent une étape intermédiaire de dégradation entre les Vertisols Modaux et les sols "hardés".

Les sols ferrugineux des plateaux

Les sols ferrugineux lessivés, parfois indurés et à nodules se situent entre 450 et 500 m d'altitude. L'horizon de surface du profil type, d'une épaisseur de 10 cm environ, se caractérise par une structure massive à éclats anguleux, avec une sous-structure polyédrique moyenne (2 à 3 cm) avec quelques concrétions ferruginisées, cailloux et graviers de quartz. Entre 10 et 40 cm, la structure reste massive mais à débit particulier. On note une présence importante d'éléments grossiers, graviers et cailloux, ferruginisés, de formes sub-arrondies. De 40 à 100 cm, la structure reste sensiblement la même. On observe une porosité vacuolaire et la présence de nombreux blocs ferruginisés (70 % en volume) et des concrétions et blocs de quartz dans la masse, de 10 cm de diamètre, irrégulièrement repartis et compacts. La réserve d'eau utile pour la végétation est similaire à celle des sols "hardés" et peu importante : 35 à 50 mm pour 50 cm de profondeur. Ces sols (SF), souvent sous jachère, sont cultivés en sorgho, arachide et coton à rendement faible en culture traditionnelle.

L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

La méthode utilisée, fondée sur des observations à l'échelle du mètre carré, permet de caler les données de simulation sur parcelle élémentaire par observation en conditions naturelles à la même échelle (1 m²) et leur transfert à des échelles plus petites (Thebe, 1987 ; Seiny Boukar, 1990). Seuls quelques résultats à l'échelle de un mètre carré seront présentés ici.

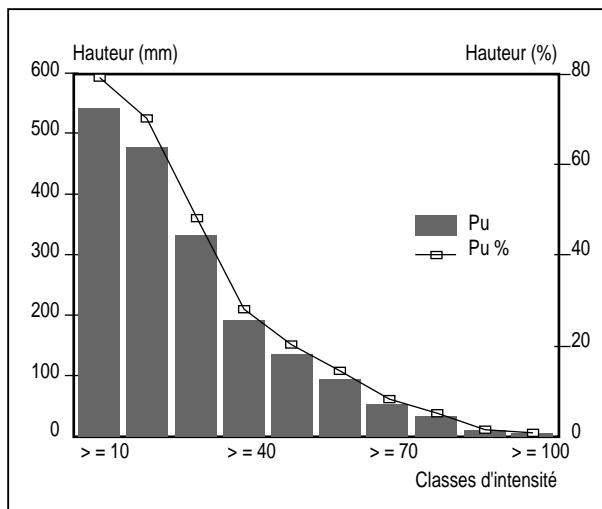
Sous pluie simulée

Le dispositif de simulation de pluie utilisé est du même type que celui mis au point par l'ORSTOM et décrit par Asseline et Valentin (1978) en Côte d'Ivoire. Ce type d'appareil présente des avantages par rapport aux mesures sous lame d'eau. Il permet non seulement l'étude de l'infiltration et du ruissellement dans des conditions de pluie proches du réel, mais aussi des pertes en terres par détachabilité, par mesure de la turbidité des eaux de ruissellement pour diverses intensités de pluies qu'on peut choisir, modifier ou maintenir constantes.

Les caractéristiques des averses à simuler et leur succession sont définies à partir de l'analyse de la pluviométrie naturelle de la station de Maroua (Kaiser, non publié ; Seiny Boukar, 1990). Il ressort de l'analyse des informations pluviographiques que les pluies d'intensité supérieure ou égale à 20 mm h⁻¹ contribuent pour près de 70 % en hauteur à la précipitation annuelle, et les intensités moyennes supérieures ou égales à 80 mm h⁻¹ pour environ 5 % (figure 4). La part des valeurs extrêmes des hauteurs appliquées (18 et 49,1 mm) à la pluviosité annuelle est respectivement 60 % et 27 % avec des

Figure 4 - Classes d'intensité des pluies significatives (> 3 mm) à Maroua (période 1980-1984).

Figure 4 - Intensity classes of significant rain (> 3 mm) at Maroua.



fréquences d'apparition de 10 à 12 fois pour les pluies supérieures ou égales à 20 mm et de 1 à 2 fois pour les pluies supérieures ou égales à 50 mm (Seiny Boukar, 1990). L'observation des averses naturelles montre par ailleurs que la durée moyenne des épisodes pluvieux est de une à deux heures.

Quatre campagnes de simulation, correspondant à une combinaison de différentes formes de pluies, se sont déroulées en saison sèche. Chaque campagne se compose de trois épisodes pluvieux espacés de 24 heures (tableau 2). Les épisodes se composent d'un certain nombre de séquences (1 à 4) d'intensité et de durée variables. L'intensité minimale d'une pluie ou d'une séquence est de 24 mm h⁻¹ et le maximum est de 72,5 mm h⁻¹. La première pluie est appliquée sur sol sec depuis 4 mois. Elle est dite pluie d'imbibition en sec, d'intensité 24 mm h⁻¹ pendant 45 minutes et pour une hauteur précipitée de 18 mm. Les diffé-

rentes variables de pluie simulée (hauteur, intensité, durée) ont été choisies de manière à se rapprocher le plus possible des averses naturelles caractéristiques de la région. La gamme d'intensités choisies est assez représentative de la pluviométrie de la région étudiée, leur fréquence est annuelle.

Les paramètres testés sur les unités de sols sélectionnés, sont ceux qui conditionnent le ruissellement et la détachabilité à savoir, les caractéristiques de la pluviométrie : hauteur précipitée, intensité, durée et fréquence des épisodes pluvieux. Les variations et les combinaisons de ces paramètres de la pluviométrie ont pour but de tester les comportements des sols, à différents états d'humidité, et leur sensibilité à l'érosion. Des prélèvements d'eau sont effectués sur chaque volume ruisselé pour mesurer la turbidité. La collecte du charriage à l'exutoire de la parcelle et la turbidité ainsi mesurée permettent une quantification de la détachabilité.

La terminologie utilisée ici (tableaux 3 et 4) se réfère à l'hydrogramme théorique de Lafforgue (1977). Après chaque séquence pluvieuse, le dépouillement des enregistrements du limnigraphe permet de déterminer les paliers de ruissellement (Rx) et d'infiltration (Fn) (figure 5).

I = intensité de l'averse en mm h⁻¹ (tableau 2),

I_{max} = intensité maximale atteinte : 72,5 mm h⁻¹ (tableau 2)

P_u = pluie utile (hauteur précipitée) (tableau 2)

P_i = pluie d'imbibition (hauteur précipitée jusqu'à l'apparition du ruissellement). Elle varie selon que la pluie est appliquée sur sol sec (P_{is}) ou sur sol humide (P_{ih})

L_r = lame ruisselée (P_u-W) en mm

R_x = ruissellement maximum stabilisé (I-IL) en mm h⁻¹

W = lame infiltrée (P_u-L_r) en mm

K_i = coefficient d'infiltration (W/P_u) x100

IL (Fn) = intensité minimale d'infiltration (I-R_x).

Sous pluie naturelle

Les études faisant intervenir des averses naturelles nécessitent un dispositif de mesure capable de fonctionner

Tableau 2 - Protocole de simulation des pluies.

Table 2 - Procedure of rainfall simulation.

N° pluie*	Intensité (mm h ⁻¹)	Durée (min)	Hauteur par séquence (mm)	Hauteur de pluie (mm)	Temps d'arrêt
1	24,0	45	18,0	18,0	4 mois
2	33,5	15	8,4	49,1	24 heures
	41,0	15	10,3		0
	49,0	15	12,3		0
	72,5	15	18,1		0
3	33,5	15	8,4	44,6	48 heures
	72,5	30	36,2		0
Total				111,7	

* : N° = numéro d'ordre des pluies

Tableau 3 - Classes d'intensités des pluies à Maroua (1980 - 1984).

Table 3 - Rainfall intensity classes at Maroua (1980 - 1984).

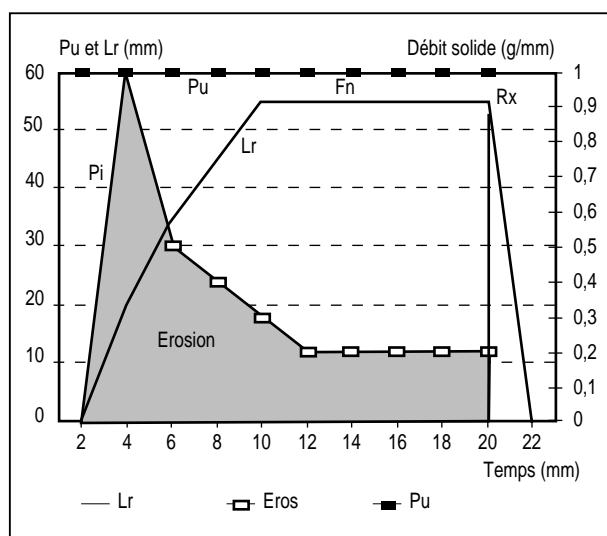
Hauteurs	Classes d'intensités des pluies naturelles (mm h ⁻¹)										
	Ž 10	Ž 20	Ž 30	Ž 40	Ž 50	Ž 60	Ž 70	Ž 80	Ž 90	Ž 100	
Moy. (mm)	686	541	477	331	191	134	93	51	32	8	2
%	100	79	70	48	28	20	14	8	5	1	0,3
Max (mm)	898	750	688	519	299	228	157	93	87	24	9
Mini (mm)	479	333	276	178	76	52	30	7	7	0	0
Ecart type	175	170	161	143	93	73	52	36	38	11	5

Tableau 4 - Comportement des sols sous pluies simulées.**Table 4** - Soil behaviour under simulated rainfall.

Sols	N°*	Pu	Pis	Pih	Lr	W	Fn	Ki %	Er** g m ⁻²
		mm							
VM	1	18,0	> 18			18,0		100	
	2	49,1		14,5	8,3	40,8		83,1	
	3	44,6		10,1	11,8	32,8		73,5	
Total		111,7			20,1	91,6	25-30		108
VD	1	18,0	9,6		4,5	13,5		75,0	
	2	49,1		7,9	28,7	20,4		41,5	
	3	44,6		4,5	37,9	6,7		15,0	
Total		111,7			71,1	40,6	15-20		637
HV	1	18,0	3,6		10,4	7,6		31,7	
	2	49,1		3,4	36,1	13,0		26,5	
	3	44,6		3,3	34,9	9,7		21,7	
Total		111,7			81,4	30,3	10-15		616
SF	1	18,0	11,6		2,1	15,9		88,3	
	2	49,1		8,4	23,3	25,8		52,5	
	3	44,6		5,5	27,8	16,8		37,7	
Total		111,7			53,2	58,5	25-30		170

* N° = numéro d'ordre des pluies

** Er = détachabilité

Figure 5 - Hydrogramme et turbidigramme théoriques (Lafforgue, 1977).**Figure 5** - Theoretical hydrogram and turbidigram (Lafforgue, 1977).

automatiquement en cas d'absence de l'opérateur. Le matériel mis en place à cet effet comprend des appareils de mesure des hauteurs et des intensités de pluies, de l'infiltration, du ruissellement et de l'érosion, ainsi qu'un dispositif de mesure de l'humidité du sol (mesure neutronique).

Sur parcelles naturelles

Les situations testées en ce qui concerne les facteurs qui conditionnent l'infiltration, sont similaires à celles sous pluie simulée. Sur chaque type de sol sont disposées deux parcelles élémentaires à l'exutoire desquelles un récipient d'une capacité de 45 litres est fixé. Les mesures sont faites après chaque averse pour déterminer le ruissellement et les pertes en terre. Les caractéristiques de l'averse sont également notées : hauteur précipitée, intensité maximale et durée.

L'analyse statistique par corrélations multiples dans laquelle les variables explicatives du ruissellement et de l'érosion, à savoir, la hauteur précipitée, l'intensité maximale en 15 min., l'indice des précipitations antérieures et le recouvrement global du sol par la végétation, a fait l'objet d'une étude détaillée (Thebe, 1987).

Sur parcelles traitées

Ce test a permis, en deux années de mesure, d'étudier le comportement sur sols (Vertisols, sols hardés et sols ferrugineux) traités à l'herbicide, de deux pratiques de conservation de l'eau, l'une chimique (amendement gypseux), et l'autre physique (paillage). Chaque type de sol est équipé de trois parcelles élémentaires de 1 m² (témoin, gypse et paille), comportant trois répétitions. La disposition des parcelles est aléatoire et leurs exutoires sont constitués de fûts enterrés, préalablement calibrés. Le gypse est appliqué en surface sous forme de phosphogypse poudreux à raison de 500 g m⁻². Il est associé à un conditionneur du sol : le PAM (polyacrylamide) qui permet d'améliorer sa fixation à la surface du sol. La quantité moyenne de PAM apportée est de 250 g m⁻². Le mulch est constitué de paille de graminée sèche étalée de façon homogène à la surface du sol à raison de 2,5 kg m⁻² en moyenne.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Parcelles naturelles

Sous pluies simulées

Les principaux résultats sous pluies simulées sont présentés au *tableau 4*.

Comportement des sols de la séquence verticale

Pour une précipitation totale de 111,7 mm en trois averses avec une intensité maximale de 72,5 mm h⁻¹, la réaction des sols de la série verticale à la pluie d'imbibition en sec (Pis), qui constitue un critère de la capacité d'absorption de l'eau de pluie par un sol desséché, varie de plus de 18 mm pour les Vertisols Modaux à 3,6 mm pour les sols "hardés" (*figure 6*).

A la seconde averse, plus importante (49,1 mm) et plus agressive ($I_{max} = 72,5 \text{ mm h}^{-1}$), survenant 24 heures plus tard, les différentes valeurs de la pluie d'imbibition (Pih2) (*figure 6*) sont plus réduites mais le comportement des sols suit la même tendance. Cette valeur de la pluie d'imbibition représente 30 % environ de la pluie utile dans le cas des Vertisols Modaux ; elle n'est que de 7 % environ pour les sols hardés.

Les coefficients d'infiltration (Ki) vont de 100 % lors de la première séquence pluvieuse pour les sols présentant la plus forte valeur de Pis, à 25-30 % pour les sols hardés (*figure 7*). Dès la seconde averse, ces coefficients ont sensiblement

Figure 6 - Pluie d'imbibition sur sol sec (Pis) et humide (Pih).

Figure 6 - Initial rain on dry soil (Pis) and subsequent rain on moist soil (Pih).

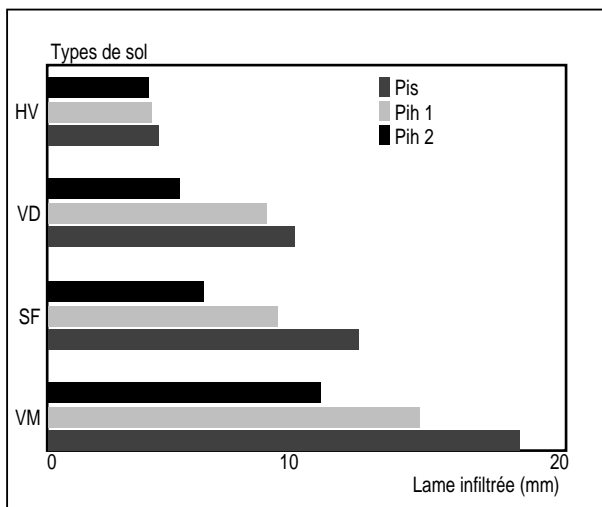
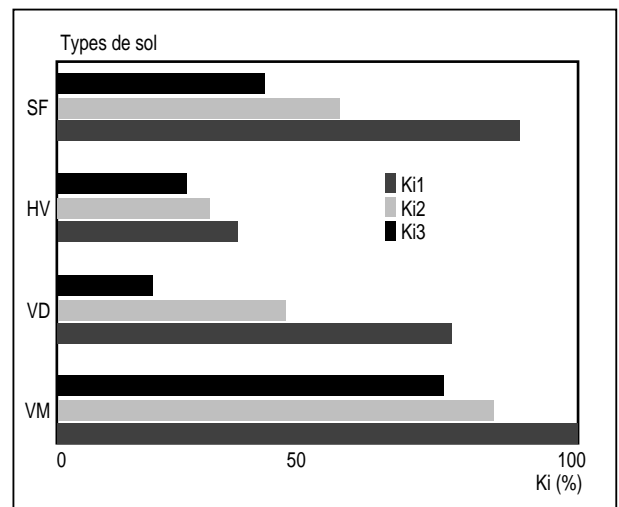


Figure 7 - Coefficients d'infiltration des pluies sur la série vertisolique et sur les sols ferrugineux.

Figure 7 - Rainfall infiltration coefficients on vertic and ferruginous soils.



baissé et ne représentent que 83 %, 42 % et 26 % pour les VM, VD et VH respectivement. On observe la même tendance à la troisième averse.

Le gonflement des argiles smectitiques des VM entraîne la fermeture des fentes et fait tomber le Ki de 100 % en sec à 73 % à la troisième averse.

L'absence de structure des sols "hardés" et la formation de la pellicule de battance généralisée semblent être responsables des faibles valeurs de Ki observées sur ce type de sol.

Les Vertisols Dégradés présentent un comportement intermédiaire, avec une pluie d'imbibition en sec de 9,6 mm, représentant 53,3 % de la pluie utile, et un coefficient d'infiltration de la pluie d'imbibition de l'ordre de 75 %.

D'une manière générale, le comportement des sols de la séquence verticale est variable et présente un gradient net. On observe une décroissance importante des coefficients Ki de la première à la troisième pluie d'une part, et des VM aux HV d'autre part. Les Vertisols Modaux (Ki moyen = 82,0 %) infiltrent trois fois plus que les sols "hardés" (Ki = 27,1 %). Les Vertisols Dégradés présentent des coefficients intermédiaires (Ki moyen = 36,3 %), mais plus proches des sols "hardés".

Comportement des sols ferrugineux

Les trois averses appliquées entraînent un ruissellement. La pluie d'imbibition (Pis) contribue pour 73 % de l'infiltration totale au cours de la première averse. Lors de la troisième pluie, Pi (Pih3) est faible (5,5 mm) et ne représente que 12,3 % de la pluie utile. On observe également comme dans le cas de la séquence verticale une décroissance nette des coefficients d'infiltration de la première (Ki = 88,3) à la troisième averse (Ki = 37,7 %). Dans les conditions expérimentales, au moins la moitié des pluies appliquées sur les sols ferrugineux s'infiltrent dans les sols (Ki moyen = 52,4 %).

En résumé, au cours de cette campagne les précipitations cumulées de trois averses avec une intensité maximale de 72,5 mm ont atteint 111,7 mm, le coefficient d'infiltration des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol varie de 82 % (Vertisol Modal) à 27,1 % (sol hardé). Les intensités limites d'infiltration (Fn) sont relativement faibles et varient de 25 à 30 mm h⁻¹ pour le Vertisol Modal, de 15 à 20 mm h⁻¹ pour le Vertisol Dégradé et de 10 à 15 mm h⁻¹ pour le sol hardé. Ces valeurs limites correspondraient aux intensités maximales d'irrigation par aspersion sur ces sols, valeurs au-delà desquelles, il y aurait perte d'eau par ruissellement. La charge solide moyenne passe de 5,5 g mm⁻¹ m⁻² pour le Vertisol Modal, à 8,7 g mm⁻¹ m⁻² pour le faciès dégradé.

Sur les sols ferrugineux, l'efficacité moyenne des pluies est de 52,4 % pour 111,7 mm précipités et pour une intensité minimale d'infiltration de 25 à 30 mm h⁻¹. Au cours des ces averses, 170 g de terre ont été exportés pour une charge solide moyenne de l'ordre de 3,1 g mm⁻¹ m⁻².

Sous pluies naturelles

Au cours de deux années d'expérimentation (1986-1987), 49 événements pluvieux ont été répertoriés. Les coefficients moyens d'infiltration déterminés sous pluie naturelle sont présentés dans le *tableau 5*.

Les sols de la série verticale présentent des Ki qui semblent être en relation avec leur niveau de dégradation (Ki varie de 49 à 63 % pour 600 mm précipités). A l'opposé des faciès dégradés de la séquence verticale (VD et HV), les sols ferrugineux présentent une infiltration beaucoup plus élevée mais proche des Vertisols Modaux. Ces résultats semblent confirmer ceux obtenus sous pluie simulée. La sensibilité des sols à l'érosion n'a pas pu être appréciée sur les Vertisols Modaux et sur les sols ferrugineux. La charge solide moyenne varie de 7,06 g mm⁻¹ m⁻² sur les sols hardés, à 7,8 g mm⁻¹ m⁻² sur les Vertisols Dégradés.

Sur parcelles traitées

Sous pluies naturelles

Le comportement des sols testés est variable selon les deux traitements.

Sous paillage

Le *tableau 6* donne les moyennes des coefficients d'infiltration des sols testés et leur amélioration relative après apport du mulch (paillage) ou du gypse. La méthode physique qui consiste à disposer de la paille à la surface du sol s'est avérée la plus efficace. L'amélioration du coefficient d'infiltration des pluies est de 84,7 % environ sur les sols ferrugineux et atteint 121 % sur les Vertisols Modaux. La dose moyenne de 2,5 kg m⁻² a donné également des résultats satisfaisants sur les sols "hardés" (64,8 %).

Tableau 5 - Paramètres hydrodynamiques mesurés sous pluie naturelle.

Table 5 - Hydrodynamic parameters measured under natural rainfall.

Sols	VM	VD	HV	SF
Pu (mm)	600	600	600	780
Lr (mm)	222	246	306	257
Ki (%)	63	59	49	67
Er (g m ⁻²)	ND	1910	2160	ND

ND : non déterminé

Sous gypse

L'efficacité du gypse semble compromise sur les sols "hardés" tout comme sur certains Vertisols, ce qui peut être expliqué par l'action des eaux de ruissellement qui l'exportent hors de la parcelle ou l'accumulent dans les fentes de retrait au début de la saison des pluies. Lorsque les fentes se ferment plus tôt, l'efficacité du gypse est plus élevée. Le gypse, associé à un conditionneur du sol (PAM), semble être plus efficace sur les sols ferrugineux où l'on a observé une amélioration relative du coefficient d'infiltration de 28,4 %.

CONCLUSIONS

Sous pluie simulée et sur sols nus, différents types de comportement apparaissent sur la gamme des sols testés :

Le faciès modal de la série vertique, absorbe la totalité des premières averses, puis l'efficacité diminue après la fermeture des fentes ; le coefficient d'infiltration moyen est de 82 % sous pluies simulées.

Sur les autres faciès (VD et HV) peu structurés en surface, et présentant des organisations pelliculaires de surface, le ruissellement apparaît dès la première averse. Leur sensibilité à l'érosion est élevée. Les Ki décroissent rapidement avec le niveau de dégradation. L'intensité limite d'infiltration (F_n) de l'ensemble des sols de la série vertique est peu élevée ; de 25-30 mm h⁻¹ pour les Vertisols Modaux à 10-15 mm h⁻¹ pour les sols "hardés". Au cours d'une année normale, ces intensités contribuent environ pour 50 à 80 % à la pluviométrie totale.

L'infiltration moyenne sur les sols ferrugineux est supérieure à 50 %. Ces différents résultats sont confirmés par ceux obtenus sous pluie naturelle où l'on a observé des coefficients d'infiltration faibles sur la séquence vertique et particulièrement sur les faciès dégradés (VD et HV). Pour tous les sols étudiés,

le coefficient d'efficacité peut être amélioré soit par apport du mulch (paillage), soit par application de gypse associé à un conditionneur du sol (PAM). Le paillage présente un avantage par rapport aux autres pratiques de conservation des ressources en sol et en eau. En même temps qu'il protège le sol contre les effets mécaniques des précipitations, il constitue une source importante de matière organique pour ces sols qui en sont déficients. A défaut d'élaboration d'un programme d'irrigation régionale onéreux, ces méthodes de conservation des ressources en eaux peuvent constituer des solutions à court et moyen termes.

Les coefficients d'infiltration ainsi déterminés donnent une meilleure indication sur la pluie effective dans le calcul du déficit hydrique, que les méthodes usuelles utilisées en évaluation des terres.

BIBLIOGRAPHIE

- Asseline J., Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. XV,4 : 321-349.
- Brabant P., Gavaud M., 1985 - Les sols et les ressources en terre du Nord Cameroun. Carte et notice expl. n°103 : MESRES IRA, Yaoundé, ORSTOM, Paris. Ed. ORSTOM, 285 p. + 6 cartes couleurs hors texte.
- Brabant P., 1991 - Le sol des forêts claires du Cameroun : ORSTOM (Paris), 1, 530p et 2, 278p.
- CIRAD-ORSTOM-IRA, 1993 - Les terres Hardé : caractérisation, réhabilitation dans le bassin du lac Tchad. Cahiers scientifiques n° 11, Mémoires et travaux de l'IRA n° 6 pp 9 -118.
- Debaveye J., Mahop F., Van Ranst E., et Pauwels J.M., 1989 - Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols représentatifs de la province du Nord. Centre Univ. Dschang, Dépt. Sciences du sol, Rapport Tech. n°2. 63p.
- Debaveye J., Van Ranst E., Pauwels J.M., et Mahop F., 1990 - Classification des sols représentatifs des provinces de l'Extrême-Nord et du Nord. Centre Univ. Dschang, Dépt. Sciences du sol, Rapport Tech. n°3. 45 p.
- Donfack P., 1988 - Carte des systèmes écologiques du bassin-versant de Mouda. IRA/CNS Yaoundé.

Tableau 6 - Effets du paillage et du gypse sur l'infiltration sous pluies naturelles (moyennes de deux années).

Table 6 - Effects of mulching and gypsum on water infiltration under natural rainfall (average two years).

Types de sols	Pu (mm)	Kit	Kig	Kim	Coefficients d'efficacité (%)	
					(Kig - Kit) / Kit	(Kim - Kit) / Kit
Vertisols	1 295	35,3	44,0	78,0	24,6	121,0
Sols "hardés"	1 234	40,0	50,0	65,9	25,0	64,8
Sols ferrugineux	1 170	48,3	62,0	89,2	28,4	84,7

Pu = Pluie utile ;

Kit = Coefficient d'infiltration du témoin ;

Kig = Coefficient d'infiltration du gypse ;

Kim = Coefficient d'infiltration du mulch.

- Embrechts J., Moukouri Kuoh H. Ng. et H. J. Pfeiffer, 1979 - Sols et utilisations au Cameroun. Centre Univ. Dschang, E.N.S.A. Dép. Sciences du sol, Rapport Tech. n°7. 79p.
- Gavaud M., Barbery J., Martin D., Segalen P., Siefferman G., 1980 - Carte pédologique du Nord Cameroun à 1/100 000 feuille de Bogou- Pouss. ONAREST/IRAT, Yaoundé. 87 p.
- Humbel F. X., Barbery J., 1974. - Carte pédologique de reconnaissance. Feuille Garoua à 1/200 000. Notice explicative n°53. ORSTOM Yaoundé. 113 p.
- Lafforgue A., 1977 - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM. sér. hydro. vol. XIV n°4, pp 299-344.
- Martin D., 1961 - Carte pédologique du Nord Cameroun. Feuille Mora 1/100 000. IRCAM YAoundé, ORSTOM Paris, 100p.
- Martin D., Siefferman G., Valerie M., 1966 - Les sols rouges du Nord Cameroun. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IV, 3, pp. 3-28.
- Muller J. P., Gavaud M. 1979 - Les sols du Cameroun. Atlas de la République Unie du Cameroun. Groupe J.A. 51 Avenue des Ternes, Paris pp 25-26.
- PNUD-UNSO, 1993 - Gestion de l'espace et utilisation des ressources dans la région soudano-sahélienne. 124 p.
- Segalen P., 1962 - Carte pédologique du Nord Cameroun au 1/100.000. Feuille de Maroua. IRCAM Yaoundé, ORSTOM Paris.
- Seiny Boukar L., 1990 - Régimes hydriques et dégradation des sols dans le Nord Cameroun. Thèse 3^{ème} cycle. Université de Yaoundé. 226 p.
- Siefferman G., 1963 - Carte pédologique du Nord Cameroun à 1/100.000. Feuille de Kalfou. IRCAM Yaoundé, ORSTOM, Paris.
- Smith M., 1991 - Repport on the Expert consultation on procedures for revision of FAO Guidelines for prediction of crop water requirements. FAO, Rome. 45 p.
- Suchel J.B., 1972 - La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Travaux et documents de géographie tropicale n°5. Talence. 287 p.
- Thebe B., 1987 - Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse d'Université. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier. 238 p.
- Van Ranst E., Mahop F., Debaveye J., et Pauwels J.M., 1989 - Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols représentatifs de la province de l'Extrême- Nord. Centre Univ. Dschang, Dépt. Sciences du sol, Rapport Tech. n°1. 67p.
- Van Ranst E., Stoops G., Debaveye J., Mahop F., et Pauwels J.M., 1990 - Caractéristiques micromorphologiques des sols représentatifs des provinces du Nord et de l'Extrême-Nord. Centre Univ. Dschang, Dépt. Sciences du sol, Rapport Tech. n°4. 76p.