

Techniques culturales et alimentation hydrique en zone soudano-sahélienne

Aliou Ibrahima, André Mermoud, Georges Vachaud

Une des particularités de l'agriculture pluviale, dans les pays soudano-sahéliens, est d'être pratiquée sur des sols souvent peu profonds et à faible capacité d'emmagasinement de l'eau. L'exemple du plateau central du Burkina Faso illustre bien ce fait. En effet, dans cette région, les sols ferrugineux tropicaux, avec une cuirasse affleurant parfois à moins d'un mètre de profondeur, limitent la possibilité de régulation entre les apports de pluie, discontinus dans le temps, et les besoins en eau des plantes cultivées, continus dans le temps. La répartition des précipitations pendant l'hivernage joue donc un rôle plus important que la quantité totale de pluie, très souvent adoptée pour caractériser une phase sèche ou humide. Ainsi que l'ont montré plusieurs auteurs [1-3], d'une manière générale, une seule décade sèche peut être fatale aux cultures installées sur de tels sols.

Plusieurs solutions à ce problème de

sécheresses périodiques en cours de saison des pluies peuvent être envisagées. Parmi celles-ci, on compte en particulier l'amélioration des techniques culturales traditionnelles, en vue d'augmenter les capacités d'infiltration et de stockage de l'eau par le sol. En effet, bien que cette capacité de stockage soit faible, les pratiques culturales courantes n'utilisent pas entièrement l'eau ; les techniques étudiées, dont cette publication présente les résultats obtenus pendant trois campagnes de mesures sur le site expérimental de Gampela au Burkina Faso, montrent que l'on a la possibilité de stocker plus d'eau.

Matériels et méthodes

Localisation géographique du site

L'expérimentation a été mise en place en 1989 à la station de recherches de l'Université de Ouagadougou, dans la localité de Gampela, située à une quinzaine de kilomètres au nord-est de Ouagadougou, sur l'axe routier reliant cette ville à Fada Ngourma (latitude : 12° 26' N., longitude : 1° 21' O., altitude : 275 m). Le choix du site de Gampela est fondé sur trois principaux critères : sol relativement représentatif des sols agricoles du plateau central du Burkina Faso, facilité d'accès à partir de Ouagadougou et disponibilité en matériel et main-d'œuvre

pour les différents travaux agricoles et d'installation.

Dispositif expérimental et façons culturales appliquées

Le site, d'environ 4 000 m², est divisé en seize parcelles d'égales dimensions (7 x 16 m) (figure 1). Huit parcelles font l'objet d'un labour à plat suivi d'un billonnage puis d'un cloisonnement des billons, chacune de ces opérations étant décalée d'un mois dans le temps. Les huit autres parcelles, non labourées (semis direct), font office de témoins.

Le labour à plat est réalisé à la charrue à traction bovine (profondeur moyenne 15 cm), tandis que le semis, le sarclage, les billons et leur cloisonnement sont effectués manuellement à l'aide de la daba (houe traditionnelle). Le sarclage correspond à un grattage superficiel du sol (5 cm) ; les billons ont été faits dans le sens de la pente en 1989, tandis qu'en 1990 et 1991, ils ont été perpendiculaires à la pente du terrain (pente maximale 1,5 %).

Culture étudiée

La culture étudiée est un sorgho blanc, traditionnellement cultivé sur le plateau central du Burkina Faso. On a utilisé la variété IRAT S29 à cycle long (125 jours), sensible au photopériodisme, qui peut atteindre 4 mètres de hauteur dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et minérale.

A. Ibrahima : École inter-États d'ingénieurs de l'équipement rural (EIER), 03 BP 7023, Ouagadougou 03, Burkina Faso.

A. Mermoud : Institut d'aménagement des terres et des eaux (IATE), département de génie rural, EPFL, 1015 Lausanne, Suisse.

G. Vachaud : Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE/IMG), 38041 Grenoble cedex 9, France.

Tirés à part : A. Ibrahima

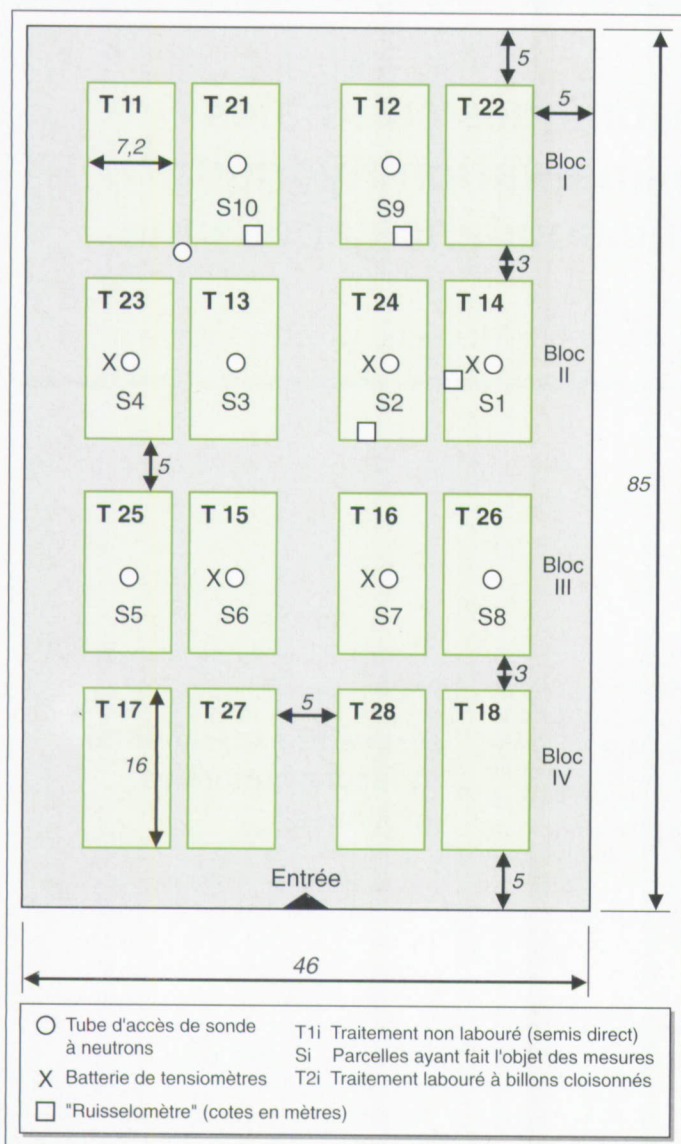


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental de Gampela.

Figure 1. Layout of Gampela experimental site.

limon et en sable fin. Le ruissellement superficiel peut donc être important. Cette forte susceptibilité à la battance, associée à une faible capacité de rétention, montre l'importance que peuvent prendre les techniques culturales dans ce type de sol.

Le climat de la zone du plateau central du Burkina Faso est caractérisé par une alternance entre deux saisons bien marquées : d'une part, une saison sèche pendant laquelle la pluviométrie est nulle et la demande en évaporation très forte (jusqu'à 350 mm par mois), d'autre part, une saison pluvieuse de 4 à 5 mois (mai à septembre). La moyenne pluviométrique enregistrée à Ouagadougou est de

Summary

Agricultural techniques and water supply in the Sudano-Sahelian zone

A. Ibrahimia, A. Mermoud, G. Vachaud

The effects of level ploughing with clustered ridges on water balance of a sorghum crop were monitored from 1989 to 1991 at the experimental site of Gampela (Burkina Faso), and compared with those of the traditional direct sowing technique. It appeared that the farmer technique increased infiltration by around 20%. In some cases, this may result in non-negligible percolations at the base of the root profile. Nevertheless, the faster and more complete recharge of the root zone's water reserve allowed for earlier planting of crops, better rooting, and decreased susceptibility to short dry spells during the growing period. In all cases, yields from ploughed parcels with clustered ridges were 30% higher than those from traditional parcels, (i.e. direct sowing). The technique's efficacy could be improved further through the use of organic and mineral fertilisation.

Cahiers Agricultures 1995 ; 4 : 29-38.

Le semis est réalisé à la main, avec un écartement de 0,80 mètre entre les lignes et 0,40 mètre entre les poquets. Un démariage, à trois plantules par poquet, est fait dès la deuxième semaine après la levée. Les parcelles n'ont reçu aucun engrais, ni organique ni minéral, durant les trois années d'expérimentation.

Conditions pédoclimatiques

Le sol en place est un sol ferrugineux tropical lessivé induré profond selon la classification FAO citée par le Bureau national des sols (Bunasols). La pente du terrain est comprise entre 0 et 1,5 %. La roche mère est formée d'altérites kaoliniques sur roches granito-gneiss. Le sol

ne présente ni cailloux, ni affleurements rocheux en surface.

Un profil de la texture, réalisé en 1989 au début de l'essai au milieu du site expérimental, a montré que le sol présente les caractéristiques d'une dégradation poussée, à savoir un faible taux de matière organique (inférieur à 0,7 % en moyenne) et une texture sablo-limoneuse en surface, avec un taux d'argile assez élevé en profondeur, associé à un pH légèrement acide et une teneur en fer libre très élevée. Malgré un taux d'azote assez faible, ce sol est riche en éléments assimilables (phosphore et potassium), du moins en début d'essai. Il présente une très forte sensibilité à la battance en surface, compte tenu de la teneur élevée en

760 millimètres (1969-1988). Les variations interannuelles sont très fortes et la répartition des pluies au cours de la saison est souvent irrégulière, ce qui occasionne fréquemment des périodes de sécheresse de une à deux semaines.

Par conséquent, plus le cycle cultural est long, moins la sécurité de production est grande. Les risques culturaux sont d'autant plus importants que la durée de la saison des pluies est réduite, mais aussi et surtout, que l'apparition de sécheresses en cours du cycle cultural devient plus importante. Depuis les années 60, le nombre de périodes où la durée du déficit excède dix jours consécutifs au cours de la saison des pluies a tendance à croître [4]. Les techniques culturales visant l'amélioration de l'alimentation hydrique prennent donc toute leur importance.

Méthodes d'observation et de mesures

• Équipement du site

Au milieu de chacune des parcelles intérieures des blocs II et III (figure 1), est installé un tube d'accès de sonde à neutrons en aluminium. Des batteries de tensiomètres placés à 0,20, 0,40, 0,60 et 0,80 mètre de profondeur équipent deux parcelles labourées (S10, S2) et deux non labourées (S9, S1). Cette instrumentation a été complétée dès la deuxième campagne d'essais par un dispositif de mesure de ruissellement installé sur ces différentes parcelles. Un pluviomètre à lecture directe et un pluviographe à augets basculeurs sont également installés sur le site.

• Mesures d'humidité du sol

Le relevé des profils hydriques est réalisé à l'aide d'un humidimètre neutronique (type CPN). En général, les mesures sont effectuées après chaque épisode pluvieux, entre le début de la saison des pluies et le semis, puis pratiquement tous les jours du semis à la récolte du sorgho. Le passage à l'humidité volumique du sol a nécessité un étalonnage préalable de la sonde à neutrons.

Compte tenu du volume important de données disponibles, leur traitement a été effectué à l'aide du logiciel AIDHYS [5] réalisé par l'Institut de mécanique de Grenoble.

Encadré 1.

Méthode de calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique entre deux dates données est calculé à partir de l'équation de la conservation de la masse d'eau :

$$ETR = (P - R) \pm \Delta S \pm D \quad (2)$$

où ETR est l'évapotranspiration réelle de la culture, P la pluviométrie, R le ruissellement, ΔS la variation du stock hydrique du sol entre la surface et la cote Z considérée, D le drainage ou la remontée capillaire à la cote Z. La principale difficulté rencontrée lors de l'utilisation de cette relation est l'estimation du terme D qui nécessite généralement la connaissance de la relation conductivité hydraulique-teneur en eau ($K(\theta)$) à la cote Z.

Lorsque la loi $K(\theta)$ est connue et le gradient de charge hydraulique

mesurée, la valeur du terme D est calculée à l'aide de la loi de Darcy :

$$D = \sum_{i=1}^n q_i \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

avec

$$q = -K(\theta) \text{grad}H \quad (\text{mm/j}) \quad (4)$$

où q est le flux moyen journalier (mm/j), θ la teneur en eau (cm^3/cm^3), $K(\theta)$ la conductivité hydraulique moyenne journalière (mm/j), gradH le gradient de charge hydraulique moyen journalier, et n le nombre de jours de l'intervalle de temps considéré.

Method for calculating the water balance

Tableau 1

Paramètres des relations $K(\theta)$, obtenus sur le site de Gampela en 1991 (K en mm/h)

Sites	Z = 0,70 m		Z = 0,50 m		r
	A	B	A	B	
S1	5,105.10 ¹²	20,45	7,29.10 ¹²	20,55	0,999
S2	5,216.10 ¹⁶	28,51	3,10.10 ⁸	13,87	0,981

Z : profondeur du sol caractérisée ; S1 : parcelle non labourée ; S2 : parcelle labourée ; A et B : coefficients ; r : coefficient de corrélation.

Parameters of $K(\theta)$ relations obtained at the Gampela site in 1991 (K in mm/hr)

Tableau 2

Ruissellement sur S1 et S2 en 1990 (15 juillet-3 octobre) et pendant le cycle cultural 1991 (8 juin-24 septembre)

Campagne	Pluie (mm)	S1 (non labouré)		S2 (labouré)	
		R (mm)	R (%)	R (mm)	R (%)
1990	322	124	38,5	80	24,8
1991	486	165	34,0	67	13,8

R (mm) : lame d'eau ayant ruisselé en mm ; R (%) : coefficient de ruissellement correspondant en %.

Runoff on S1 and S2 in 1990 (July 15th to October 3rd) and during the planting season 1991 (June 8th to September 24th)

• Mesures de la pression de l'eau du sol

Ces mesures sont effectuées à l'aide de tensiomètres installés au centre de la parcelle, autour du tube d'accès de sonde à neutrons, à une distance minimale de 0,30 mètre de celui-ci. L'installation est faite généralement de façon progressive pendant la campagne en suivant l'avancement du front d'humectation. Les mesures sont dès lors faites quotidiennement jusqu'à la récolte.

• Mesures de ruissellement

Afin d'estimer les quantités d'eaux ayant ruisselé au niveau des parcelles élémentaires, des dispositifs de mesures de ruissellement ont été installés en 1990 sur deux parcelles non labourées (S1 et S9) et sur deux parcelles labourées (S2 et S10). Ces dispositifs [6], d'une superficie de 1 m², recueillent l'eau dans un récipient de 50 litres placé dans un trou creusé à l'exutoire de l'appareillage. Après chaque épisode pluvieux, le volume d'eau recueilli est relevé. Ce volume, rapporté à la surface du dispositif, donne directement la lame d'eau ayant ruisselé, supposée identique à celle perdue par la parcelle entière.

• Caractérisation hydrodynamique du sol

Avec le double objectif de permettre une meilleure compréhension des processus hydrodynamiques et une estimation des flux d'eau percolant à la base du profil racinaire, deux essais de caractérisation hydrodynamique ont été réalisés en 1990 et 1991 sur les tubes S2 représentant le traitement labouré et S1 pour le traitement non labouré (figure 1). La méthode utilisée (essai de drainage interne) a été décrite [7, 8]. La caractérisation hydrodynamique a été effectuée à deux profondeurs : à la cote 0,70 m, base du profil racinaire, et à la cote intermédiaire 0,50 mètre, pour l'estimation des prélèvements racinaires par horizon de sol. Dans les deux cas, les points obtenus s'ajustent bien à une loi de la forme :

$$K(\theta) = A \theta^B \quad (1)$$

où K : conductivité hydraulique du sol,
 θ : teneur en eau volumique.

Les valeurs des coefficients A et B, obtenues par régression linéaire [9], sur les deux sites de référence (S1 et S2), sont présentées dans le tableau 1. La valeur de la conductivité hydraulique saturée Ks est de l'ordre de 60 mm/h en moyenne, et celle de la teneur en eau à saturation (θ_s) de l'ordre de 0,29 à 0,30 cm³/cm³.

• Observation du système racinaire

La méthode ITCF (Institut des techniques de céréales France) a été utilisée [10, 11]. Elle permet d'estimer la densité racinaire par tranche de sol, l'extension latérale et la profondeur maximale (zr) atteinte par les racines, qui est de l'ordre de 0,70 m.

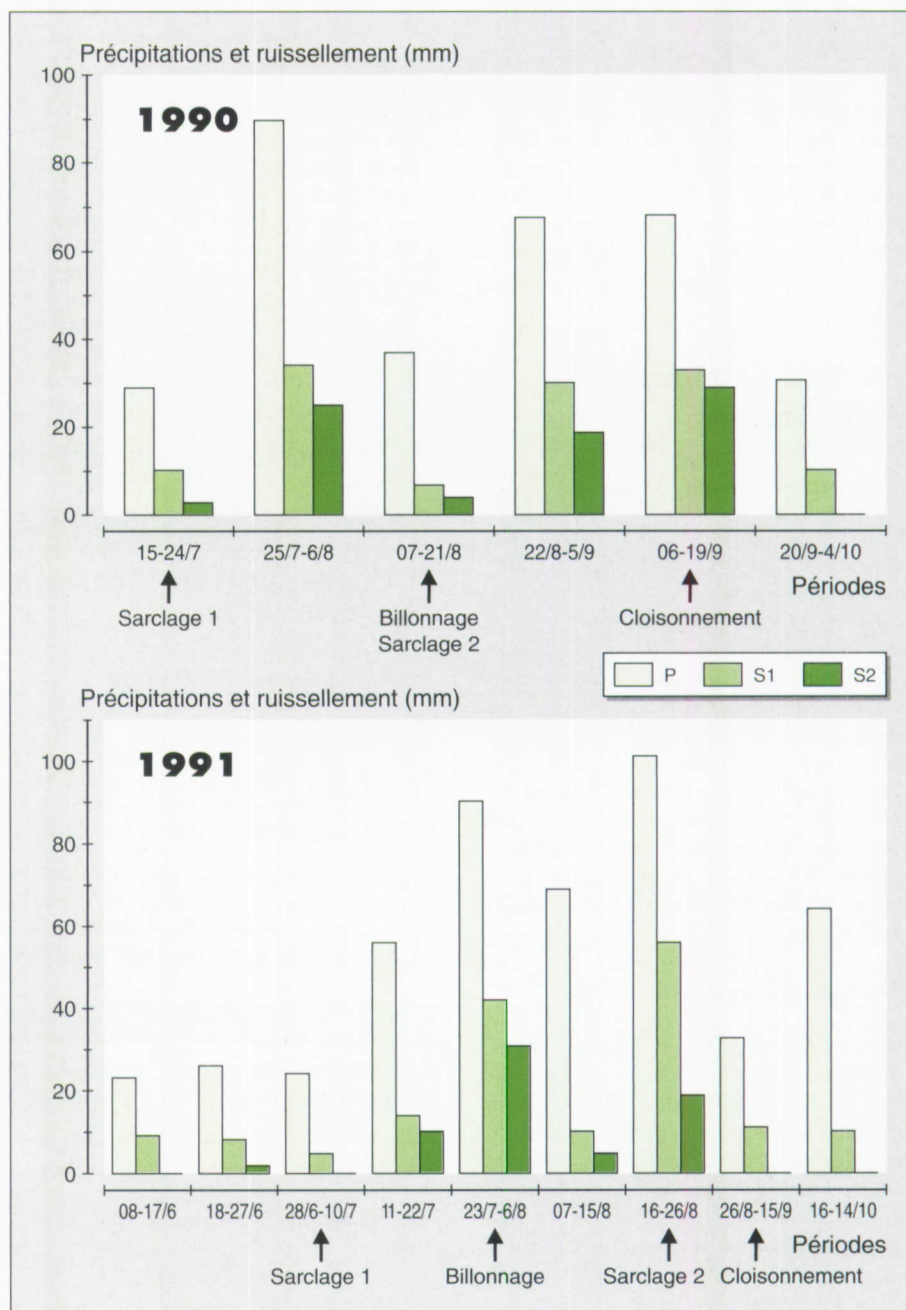


Figure 2. Comparaison des lames d'eau ayant ruisselé sur S1 (non labourée) et S2 (labourée à billons cloisonnés) en 1990 et 1991.

Figure 2. Comparison of runoff amounts on S1 (unworked) and S2 (level ploughing with clustered ridges) in 1990 and 1991.

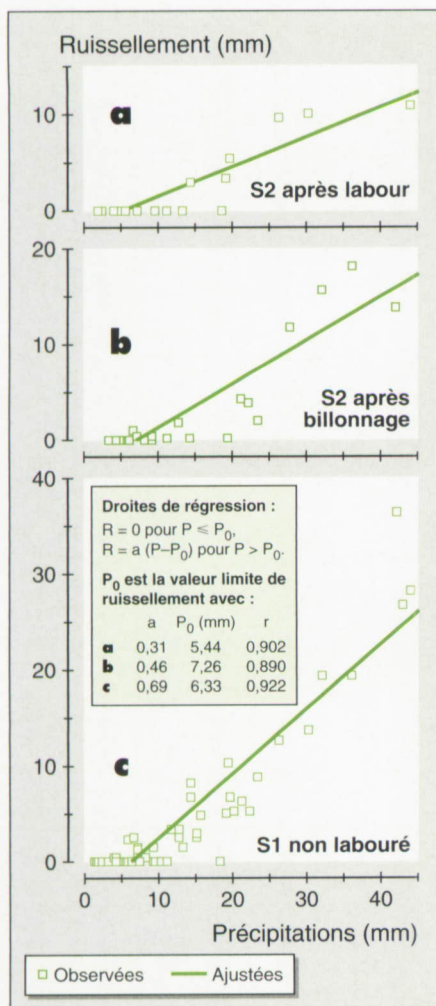


Figure 3. Ruissellement et précipitations : valeurs observées et ajustées.

Figure 3. Runoff and precipitations (observed and adjusted values, P_0 is the value limit for runoff).

Résultats

Choix des sites de référence

Deux sites de référence ont été retenus sur la base de critères [9] permettant d'établir les différentes comparaisons entre les deux techniques culturales (ou traitements). Ce sont le site S1 non labouré (semis direct) et le site S2 en labour à plat plus billons cloisonnés.

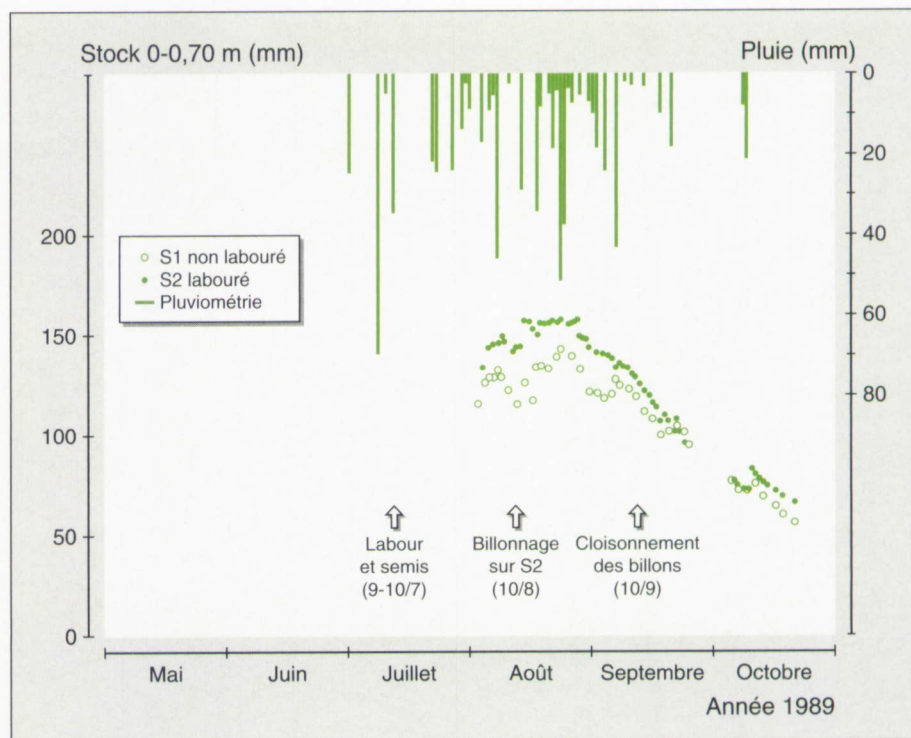


Figure 4. Pluviométrie et évolution temporelle des stocks d'eau dans le sol sur les parcelles S1 et S2 en 1989.

Figure 4. Rainfall measurements and change in soil water reserves through time in parcels S1 and S2 in 1989.

Effets du labour à plat plus billons cloisonnés sur les composantes du bilan hydrique

• Ruissellement

Les mesures effectuées en 1990 et 1991 pendant le cycle cultural indiquent une diminution importante du ruissellement due au travail du sol (tableau 2).

Les valeurs observées sont proches de celles obtenues par Roose [12] à Saria et à Gampela pour les mêmes types de traitements.

La comparaison des lames d'eau ayant ruisselé sur S1 et S2 au cours de différentes périodes, pour les deux campagnes (figure 2), conduit aux observations suivantes :

- le ruissellement est toujours supérieur sur S1 (parcelle non labourée) ;
- l'influence du labour sur le ruissellement diminue rapidement avec le temps ;

- les billons cloisonnés ne suppriment le ruissellement que lors des faibles pluies (hauteur instantanée ≤ 30 mm) : les valeurs présentées à la figure 2 sont des valeurs cumulées par période. Les hauteurs de pluies journalières sont portées sur les figures 5 (1990) et 6 (1991) ;

- sur le traitement non labouré (S1), le sarclage permet de réduire, de façon importante, la lame d'eau ayant ruisselé. On a établi des relations entre la hauteur précipitée et la lame ayant ruisselé pour les deux campagnes. Les résultats obtenus (figure 3), pour des hauteurs de précipitation comprises entre 1 et 45 millimètres, montrent que, dans l'ensemble, il existe une bonne relation entre le ruissellement et la hauteur de précipitation. Le ruissellement sur une parcelle non labourée peut exister même pour de faibles hauteurs de précipitation ; par ailleurs, plus la hauteur de pluie est importante, plus l'écart de lame d'eau ayant ruisselé est grand entre parcelle labourée et parcelle non labourée.

• Stockage de l'eau du sol

Les figures 4, 5 et 6 présentent l'évolution temporelle du stock hydrique pour les trois campagnes de mesures.

On note, en général, deux grandes phases dans l'évolution du stock hydrique, à savoir une phase de recharge allant de la fin de la saison sèche (fin avril-début mai) jusqu'à mi-août et une phase de diminution du stock hydrique à partir de la mi-août. Par ailleurs, l'évolution du stock hydrique, au cours de ces deux phases, est étroitement corrélée à la fréquence et aux hauteurs de précipitations et est fonction du type de traitement du sol (non labouré ou labouré à billons cloisonnés).

En début de la campagne 1990 (figure 5), les billons cloisonnés sur la parcelle S2 ont eu un effet très significatif sur l'infiltration des premières pluies et, par conséquent, sur la reconstitution du stock hydrique. Cependant, les averses très violentes du mois de mai 1991 (figure 6), avec une intensité atteignant 120 mm/h (pluie de 70 mm le 22 mai), n'ont pas eu autant d'effet, malgré l'existence des billons cloisonnés. Ce n'est que pendant la période la plus pluvieuse (mi-juillet à mi-août) que le stock a pu se reconstituer totalement.

Pendant la phase de reconstitution du stock hydrique, la différence entre les deux traitements réside dans la cinétique de recharge. Celle-ci est plus importante sur la parcelle labourée à billons cloisonnés (S2) que sur la parcelle cultivée traditionnellement (S1).

Les valeurs maximales du stock hydrique atteintes à la mi-saison des pluies sur les deux parcelles montrent une différence de 31 millimètres en 1990 et de 56 millimètres en 1991 en faveur de la parcelle labourée à billons cloisonnés (S2). En 1989 en revanche, cette différence est beaucoup plus faible (12 mm seulement). Cela s'explique notamment par le fait qu'il n'y a pas eu de billons cloisonnés en début de campagne.

Le rythme de diminution du stock hydrique en fin de campagne dépend du niveau atteint à la fin de la reconstitution en mi-saison des pluies. Aussi, observe-t-on une pente presque identique sur les deux courbes (S1 et S2, figures 4 à 6), avec un décalage d'autant plus important que le stock maximum sur la parcelle labourée (S2) est plus élevé à la mi-saison.

L'effet des billons cloisonnés est surtout important en début de campagne, période

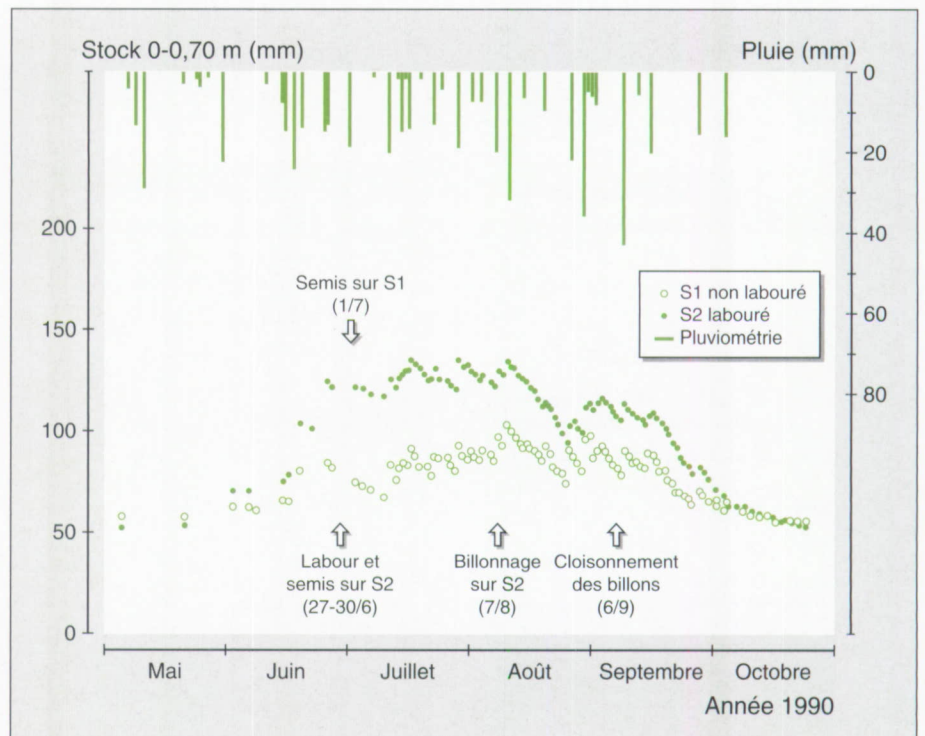


Figure 5. Pluviométrie et évolution temporelle des stocks d'eau dans le sol sur les parcelles S1 et S2 en 1990.

Figure 5. Rainfall measurements and changes in soil water reserves through time in parcels S1 and S2 in 1990.

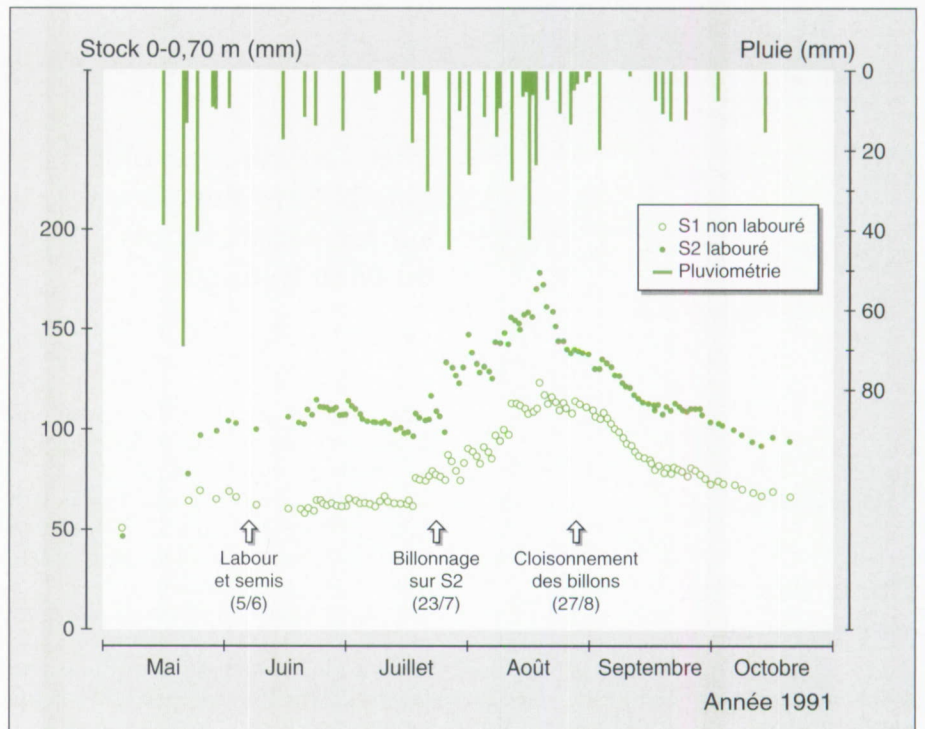


Figure 6. Pluviométrie et évolution temporelle des stocks d'eau dans le sol sur les parcelles S1 et S2 en 1991.

Figure 6. Rainfall measurements and changes in soil water reserves through time in parcels S1 and S2 in 1991.

pendant laquelle ils favorisent une meilleure infiltration et une meilleure reconstitution du stock hydrique du sol. Dans ce cas, un seul semis suffit tandis que, sur les parcelles non labourées, un deuxième semis devient obligatoire après une semaine sans pluie, comme cela a été le cas en 1990. Enfin, le labour a eu un effet très limité dans le temps, tandis que le billonnage, lorsqu'il est fait dans le sens de la pente (1989), accroît le ruissellement et diminue l'infiltration des eaux météoriques.

• Flux de percolation

Les relations (3) et (4) de l'encadré 1 ont été utilisées pour l'estimation des flux de percolation aux profondeurs 0,50 et 0,70 mètre.

La figure 7 illustre, à titre d'exemple, les résultats obtenus en 1991 sur le site S2 ; on constate que le drainage peut être important en l'espace de quelques journées, compte tenu des variations rapides des teneurs en eau et de l'amplification due aux lois $K(\theta)$. Ceci témoigne de l'importance du choix du pas de temps dans l'estimation des percolations profondes et de l'intérêt des mesures journalières.

• Extraction racinaire

La couche de sol exploitée par les racines est divisée en deux tranches : 0-50 et 50-70 centimètres, afin de pouvoir apprécier la contribution de chaque horizon dans la consommation en eau de la culture. Pour chacune de ces deux tranches, un bilan hydrique est établi.

Une représentation simplifiée des termes des équations 5 à 8 de l'encadré 2 est fournie dans le tableau 3. Les valeurs présentées sont exprimées en millimètres d'eau et concernent tout le cycle cultural (du semis à la récolte).

Pour les deux campagnes, l'extraction racinaire dans l'horizon 50-70 centimètres est supérieure sur sol travaillé. Elle l'est moins en 1990 qu'en 1991, où l'infiltration des eaux météoriques a été plus importante. À titre indicatif, l'horizon 50-70 centimètres a contribué, en 1991, pour 62 millimètres, c'est-à-dire un peu plus de 18 % de la consommation totale (ETR) de la culture sur le traitement labouré (S2), et seulement pour 6 millimètres, soit 2 % de l'ETR, dans le cas de la parcelle non labourée.

Les prélèvements racinaires sont globalement plus importants sur sol labouré à billons cloisonnés. Par conséquent, on obtient des valeurs de l'ETR plus élevées.

Encadré 2.

Procédure de quantification

En considérant les deux horizons : 0-50 cm (horizon supérieur) et 50-70 cm (horizon profond), l'application des équations du bilan hydrique permet d'écrire (figure 8) :

- en surface :

$$Pe = P - R \quad (5)$$

- dans l'horizon 0-50 cm :

$$\Delta S_{0-50} = Pe - Pr_{0-50} - Q_{50} \quad (6)$$

- dans l'horizon 50-70 cm :

$$\Delta S_{50-70} = Q_{50} - Pr_{50-70} - Q_{70} \quad (7)$$

- l'évapotranspiration sous la forme :

$$ETR = Pr_{0-50} + Pr_{50-70} \quad (8)$$

Quantification procedure

où ΔS_{x-y} représente la variation de stock hydrique dans l'horizon x-y (mm),

P la pluviométrie observée (mm),
Pe la pluviométrie efficace (mm),
R la lame d'eau ayant ruisselé (mm),
Qx la lame d'eau ayant percolé à la profondeur x (mm)

Pr_{x-y} le prélèvement racinaire et l'évaporation dans l'horizon x-y (mm).

ΔS_{x-y} est déduit des profils d'humidité ; P est mesurée sur pluviographe ; Q_{50} et Q_{70} sont estimées par intégration de la loi de Darcy (relation 3).

Le calcul du bilan est réalisé, pour les parcelles S1 et S2, sur tout le cycle cultural (semis-récolte) par périodes décadaires sur les deux campagnes 1990 et 1991. Les valeurs de Q_{50} et Q_{70} sont obtenues par cumul des valeurs moyennes journalières relatives aux décades correspondantes.

Il y a donc, incontestablement, une meilleure utilisation de la pluviométrie sur le sol S2 par rapport au sol cultivé traditionnellement S1.

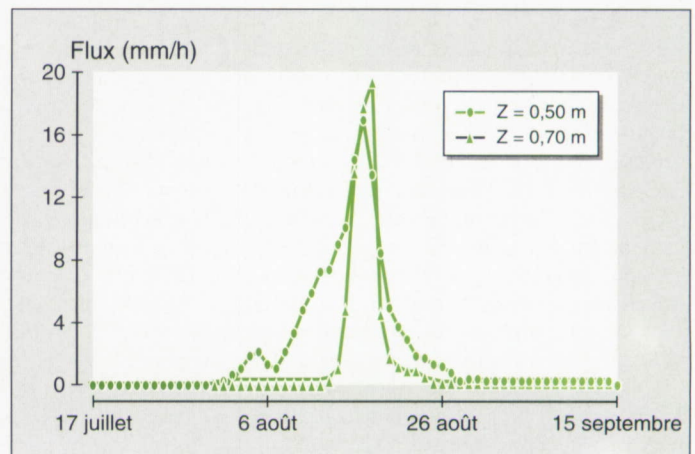
La quantité totale d'eau ($Q_{70} + R$) qui échappe à la consommation de la plante est plus importante sur le sol non travaillé. Cependant, on observe que l'écart entre les deux traitements, de l'ordre de 43 millimètres, soit 32,6 % en faveur du traitement non labouré en 1990, année de faible pluviométrie, n'est que de 28 millimètres, soit 17 % en 1991,

année où la pluviométrie a été relativement abondante. Par conséquent, bien que le sol travaillé permette une meilleure infiltration, l'eau est peu retenue dans le sol, de telle sorte que l'excédent est rapidement perdu par percolation profonde, échappant ainsi à l'extraction racinaire : l'efficacité des techniques visant à augmenter l'infiltration pour stocker plus d'eau est ainsi limitée, dans les sols, par leur faible profondeur.

Dans le sol non labouré, les échanges avec l'horizon profond sont très faibles.

Figure 7. Évolution des flux journaliers aux profondeurs $Z = 0,50$ m et $Z = 0,70$ m sur la parcelle S2 en 1991.

Figure 7. Changes in daily flux at depths $Z = 0.50$ m and $Z = 0.70$ m on parcel S2 in 1991.



Ils ne se passe presque rien au-delà des 50 premiers centimètres de profondeur, malgré parfois une assez bonne pluviométrie annuelle. Ceci conduit à un volume d'enracinement moins important comparé au sol labouré à billons cloisonnés, et donc à une faible exploitation du stock hydrique du sol dans ce cas.

• Consommation hydrique sous culture : analyse de l'ETR

Les valeurs de consommations hydriques journalières ETR (mm/j), calculées entre le semis et la récolte et par campagne pour les deux traitements étudiés, sont présentées à la *figure 9*.

Il apparaît que, globalement, les différences les plus importantes entre les deux traitements se manifestent en 1990, année à pluviométrie déficitaire et espacée. Les valeurs moyennes de l'ETR journalière du cycle végétatif (semis-récolte) illustrent bien ce fait.

Les consommations hydriques journalières moyennes sur l'ensemble du cycle végétatif sont presque identiques en 1989 et 1991 (environ 3 mm/j pour les deux traitements), mais différent sensiblement en 1990 : 2,1 mm/j pour le traitement non labouré (S1) et 3,1 mm/j pour le traitement labouré (S2), soit un écart relatif de plus de 47 %.

Ceci confirme que le labour à plat suivi des billons cloisonnés est plus efficace en année ou en période sèche.

Par ailleurs, l'examen des consommations hydriques cumulées [9] a permis de montrer que, en 1989, l'évapotranspiration réelle ETR sur l'ensemble du cycle végétatif (306 mm sur parcelle non labourée et 314 mm sur parcelle labourée) est presque identique et représente un peu plus de 50 % de la pluviométrie tombée pendant le cycle végétatif (571 mm). La différence, d'environ 260 mm, est perdue par drainage et par ruissellement (D + R).

En 1991, on note une légère différence (environ 12 %) entre les deux traitements. L'ETR représente 61 et 71 % de la pluviométrie tombée pendant le cycle végétatif et les pertes totales (D + R) correspondent à la différence, soit environ 35 et 30 % de la pluviométrie, respectivement sur S1 et sur S2. Le phénomène est très différent en 1990 où la pluviométrie a été moins abondante et plus espacée au cours de la campagne. Les besoins en eau sont largement supérieurs (35 % sur parcelle non labourée S1 et 27 % sur S2) à la pluviométrie tombée pendant le cycle végétatif (340 mm sur

Tableau 3

Paramètres du bilan hydrique observés sur S1 et S2 en 1990 et 1991 à Gampela

Année	Parcelle	Paramètres du bilan (mm)								
		P	R	ΔS_{0-50}	ΔS_{50-70}	Q_{50}	Q_{70}	Pr_{0-50}	Pr_{50-70}	ETR
1990*	S1	340	132	- 27	0	0	0	235	0	235
	S2	363	88	- 55	- 12	4	0	326	16	342
1991	S1	480	165	8	2	8	0	299	6	305
	S2	480	67	- 5	12	144	70	274	62	336

* En 1990, P sur S1 est différent de P sur S2 parce que le semis sur la parcelle S1 a été refait après une semaine sans pluies.

S1 : parcelle non labourée (semis direct) ; S2 : parcelle labourée à billons cloisonnés ; P, R, Q, Pr et ΔS (voir encadré 2) ; ETR = évapotranspiration réelle de la culture.

Water balance parameters observed on S1 and S2 in 1990 and 1991 at Gampela

S1 et 363 sur S2). L'importance de l'écart entre les valeurs de l'ETR pour les deux traitements (235 mm sur S1 et 342 mm sur S2) atteste de l'avantage de la technique de labour à plat suivi du cloisonnement des billons. L'amélioration de l'infiltration a permis un apport supérieur de 33 % dans le sol labouré à billons cloisonnés, ce qui explique la différence de plus de 45 % entre les valeurs de l'ETR.

• Production en grains du sorgho

Les chiffres évoqués dans ce paragraphe concernent les parcelles où les mesures réalisées ont permis l'estimation du bilan hydrique [9], à savoir S1, S6 et S7 en semis direct et S2, S4 et S8 en labour à billons cloisonnés.

Les rendements ont été mesurés sur chaque parcelle, sur des placettes de 5 x 3 m² en moyenne, intégrant ainsi trois à quatre lignes de semis sur douze à treize poquets. Les observations ont été faites à la fin de chaque campagne. Les résultats obtenus sont présentés à la *figure 10* qui met en relation les rendements observés et la consommation totale en eau (ETR) durant le cycle cultural (les comparaisons portent sur les valeurs moyennes).

On observe, dans tous les cas, des rendements plus élevés sur les parcelles labourées à billons cloisonnés que sur les parcelles en semis direct. En 1989, pour une différence de consommation en eau de 6 % (18 mm) en faveur du traitement labouré, la production est plus élevée d'environ 30 % sur les parcelles labourées que pour le traitement de semis direct ; le rendement est environ quatre fois plus élevé en 1990 et fait plus que

doubler en 1991. Le labour plus billons cloisonnés a donc permis une meilleure production, quelle que soit l'année considérée. La différence est plus importante en année de faible pluviométrie (1990).

Par ailleurs, on constate des écarts très élevés à l'intérieur d'un même traitement pour les trois années. Sur les parcelles non labourées, on récolte en moyenne cinq fois moins de grains en 1990 et quatre fois moins en 1991 qu'en 1989, malgré une consommation hydrique plus forte (de l'ordre de 10 %). Les rendements sont plus élevés en année à pluviométrie abondante et régulière (1989 et 1991) qu'en année à pluviométrie déficitaire et espacée (1990). Sur les parcelles labourées, la baisse des rendements

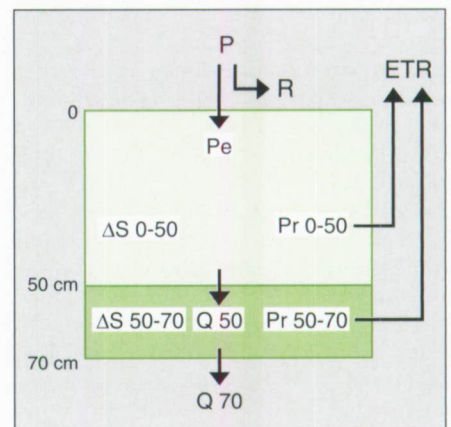


Figure 8. Représentation schématique du bilan hydrique d'un sol cultivé, constitué de deux horizons (0-50 cm et 50-70 cm).

Figure 8. Schematic representation of soil water balance of worked soil, made up of two homogeneous layers (0-0.50 m and 0.50-0.70 m).

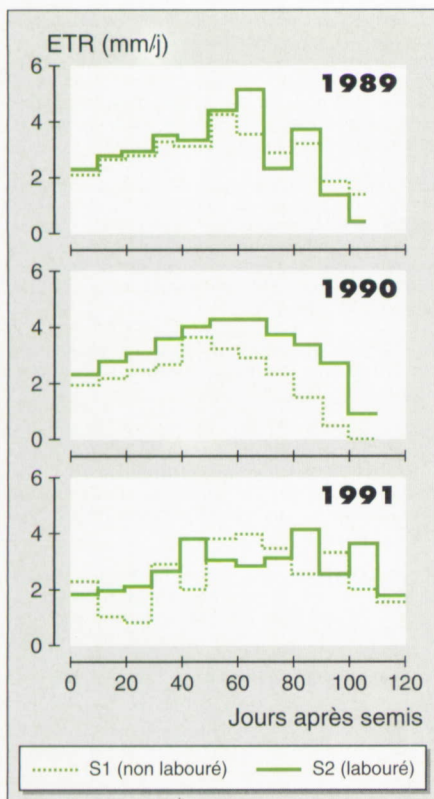


Figure 9. Consommations hydriques journalières (moyennes décadaires) du sorgho à Gampela pour les trois campagnes de mesures.

Figure 9. Daily water consumption (averaged for ten-day periods) of sorghum at Gampela for all three measurement seasons.

par rapport à 1989 reste la même (environ 50 %) en 1990 et en 1991, deux années caractérisées par une pluviométrie sensiblement différente, aussi bien en quantité (plus élevée en 1991) qu'en terme de répartition dans le temps. On constate donc que le labour à plat plus billons cloisonnés conduit à une augmentation sensible des rendements par rapport à la technique traditionnelle. Toutefois, et bien que le nombre de mesures soit insuffisant pour permettre de tirer des conclusions définitives, il apparaît que l'alimentation hydrique n'est pas le seul facteur explicatif du rendement, en particulier sur les parcelles labourées à billons cloisonnés. D'autres facteurs, notamment la fertilité du sol, contribuent à l'élaboration des rendements. Cela confirme les résultats obtenus par plusieurs auteurs [10, 11, 13-15].

Discussion

L'étude de l'effet des traitements sur les termes du bilan hydrique a mis en évidence les observations suivantes :

- le labour à plat contribue à réduire le ruissellement des eaux de pluie. Toutefois, cette réduction est limitée dans le temps (au maximum à deux à trois semaines), ce qui confirme les résultats trouvés par ailleurs [6, 12, 16] ;
- l'effet du labour se traduit essentiellement par une bonne levée et une bonne colonisation racinaire. Ceci accroît l'extraction racinaire et l'utilisation du stock hydrique du sol pour une meilleure satisfaction des besoins en eau de la culture ;
- le sarclage pendant la saison des pluies a un effet très positif sur la réduction du ruissellement et l'amélioration consécutive de l'infiltration. Toutefois, cette action positive sur l'infiltration est encore plus fugace que celle du labour à plat ;
- les billons cloisonnés réduisent considérablement le ruissellement surtout pour des pluies moyennes ne dépassant pas 25 à 30 millimètres. Ils jouent un rôle très important en début de saison en permettant une bonne recharge hydrique du sol. Toutefois, leur effet est très limité dans le cas de grosses averses ;
- le suivi de l'évolution temporelle de l'humidité du sol a permis de montrer que la vitesse d'assèchement du sol en fin de campagne, bien que ralentie par les précipitations, est surtout fonction du niveau de reconstitution du stock à la mi-saison. Dans tous les cas cependant, le stock d'eau du sol est épuisé au plus tard trois semaines après la dernière pluie utile. Ceci ne manque pas d'avoir des conséquences négatives sur la production, compte tenu de la durée du cycle cultural ;
- en l'absence de travail du sol, la percolation est faible étant donné que le ruissellement et le dessèchement sont importants ; en conséquence, les échanges avec les horizons profonds sont quasi inexistantes. Globalement, la technique du labour à plat plus billons cloisonnés permet une augmentation de l'infiltration des eaux météoriques de l'ordre de 20 à 25 %. Durant les deux campagnes (1989 et 1991) où la pluviométrie a été abondante et assez bien répartie dans l'ensemble, les différences occasionnées par cette technique sont faibles, à la fois sur les consommations hydriques et les pertes totales (D + R) qui sont presque identiques. En effet, les deux termes ruissellement (R) et drainage (D) varient en sens inverse. Lorsque la totalité de la réserve en eau du sol est reconstituée, ce qui se fait généralement rapidement compte tenu de la faible capacité de rétention en eau des sols ferrugineux tropicaux caracté-

ristiques des parcelles expérimentales, l'excédent d'infiltration est perdu par percolation profonde. Ceci pose le problème du lessivage des éléments fertilisants dès le moment où l'on favorise l'infiltration.

Conclusion

Face aux besoins alimentaires croissants générés par la forte pression démographique dans les pays africains, et en particulier au Sahel, il est crucial de développer l'agriculture pluviale, notamment par le biais d'améliorations des techniques culturales traditionnelles.

La présente étude comparative de deux techniques culturales démontre que la technique de labour à plat suivi d'un billonnage et d'un cloisonnement des billons offre un intérêt certain par rapport à la technique traditionnelle de semis direct sans travail préalable du sol, en améliorant l'alimentation hydrique et en favorisant une installation plus rapide et un meilleur enracinement de la culture.

Il apparaît toutefois que l'alimentation hydrique n'explique pas à elle seule les niveaux de rendements observés. En effet, la technique du labour à plat plus billons cloisonnés, en permettant le développement d'un système racinaire plus dense et plus profond, améliore consécutivement l'exploitation de la fertilité du sol. Ainsi, à même niveau de consommation en eau, en année de bonne pluviométrie (1991), les rendements sur parcelle labourée à billons cloisonnés sont au moins de 50 % plus élevés que ceux obtenus sur parcelle non labourée, tout en demeurant extrêmement modestes.

Bien qu'aucun bilan des substances minérales n'ait été réalisé dans le cadre de cette étude, on peut émettre notamment les hypothèses suivantes pour expliquer cette faible production :

- d'une part, les rendements élevés, obtenus en première année d'expérimentation (1989) sur toutes les parcelles, ont pu contribuer à une surconsommation des nutriments par la plante, de telle sorte que les exportations ont été très élevées ;
- d'autre part, les percolations importantes, observées en 1989 sur toutes les parcelles et en 1991 sur les parcelles labourées à billons cloisonnés, ont pu favoriser une perte importante de nutriments par voie de lessivage.

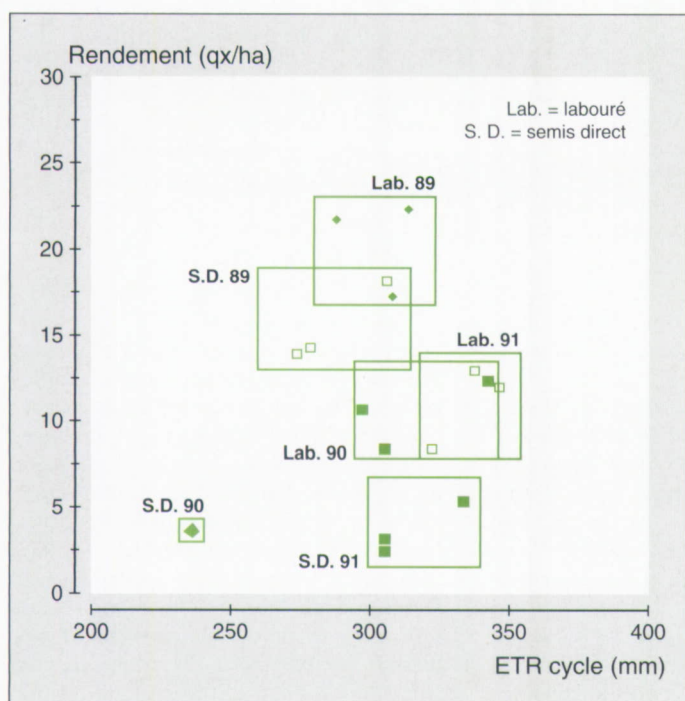


Figure 10. Relations rendement - ETR totale.

Figure 10. Relations of yield to total RET (Real Evapo Transpiration).

Ceci témoigne de la nécessité de considérer simultanément les aspects alimentaire et disponibilité en éléments nutritifs. Des recherches complémentaires sont en cours dans cette direction. Ces études devraient permettre de proposer des méthodes et des techniques adéquates susceptibles d'assurer à la fois la qualité, la quantité et la régularité des productions agricoles en zone soudano-sahélienne. Toutefois, avant leur application, il serait également intéressant de quantifier le coût de ces techniques et d'en tester la faisabilité et la rentabilité ■

Références

1. Chaouch A. *Structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne*. Thèse de docteur en hydrologie et hydrogéologie quantitative, Ecole Nat Sup des Mines de Paris, 1988 ; 263 p.
2. Walbadet E, Perrochet P, Mermoud A. Régime hydrique en conditions climatiques naturelles d'un sol latéritique du Burkina Faso. In : *The state of the art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa*. Proceedings of the Sahel Forum. Ouagadougou : CIEH, 1989 : 361-9.
3. Ibrahima A, Schmitt A, Guillerminet A, Mermoud A. Bilans hydriques sur sol latéritique du plateau Mossi. Étude comparée d'un sol sous culture non labouré et labouré à billons cloisonnés. In : *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*. Paris : AUEP/UREF, 1991 : 155-62.

4. Bosc PM, Calkins P, Young JM. *Développement et recherche agricole dans les pays sahéliens et soudaniens d'Afrique*. Montpellier : CIRAD, DSA, 1990 ; 310 p.
5. Laty R, Vachaud G. *AIDHYS 2 notice d'utilisation : logiciel de traitement de mesures hydriques du sol*. CNRS, Inst. de Mécanique de Grenoble, 1986 ; 49 p.
6. Ibrahima A, Schmitt A. Bilan hydrique à la parcelle : cas d'une étude réalisée sur le plateau Mossi au Burkina Faso. In : *Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone*. Proceeding of Niamey Workshop. IAHS Publ 1991 : 199 : 289-98.
7. Vachaud G, Dancette C, Sonko M, Thony JL. Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann Agron* 1978 ; 29 : 1-36.
8. Green RE, Ahuja LR, Chong SK. Hydraulic conductivity, diffusivity and sorptivity of unsaturated soils: field methods. In : *American society of Agronomic-Soil Science Society of America* 1986 : 771-97.
9. Ibrahima A. *Amélioration des potentialités hydriques en cultures pluviales. Application à une culture de sorgho sur le site expérimental de Gampela (Burkina Faso)*. Thèse de doctorat ès Sciences techniques. Lausanne : EPFL, 1993 ; 136 p.
10. Nicou R, Ouattara B, Some L. Efets des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil) au Burkina Faso. *Agron Trop* 1990 ; 45 : 43-57.
11. Some L. *Diagnostic agroclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Études de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs*. Thèse de doctorat, Physiologie, biologie des organismes et des populations, agronomie. Montpellier : USTL, 1989 ; 312 p.

12. Roose EJ. *Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne - Saria (Haute Volta) : synthèse des campagnes 1971-1974*. Paris : Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer, Centre d'Adiopodoumé, laboratoire de pédologie, 1979 : 26-47.

13. Cisse L. *Études des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal*. Thèse docteur en sciences agronomiques. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1986 ; 184 p.

14. Chopart JL, Nicou R. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. *Agron Trop* 1989 ; 44 : 269-81.

15. Vachaud G, Vauclin M, Cisse L. Mesure *in situ* de consommation en eau des cultures pluviales par humidimétrie neutronique. In : *Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone*. Proceeding of Niamey Workshop. IAHS Publ 1991 ; 199 : 275-88.

16. Boukar LS. Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun. In : *Food grain production in semi-arid Africa*. Proceedings of an International Drought Symposium, 19-23 May 1986, Nairobi. Ouagadougou : SAFGRAD Publications, 1987 : 91-9.

Résumé

Les effets de la technique de labour à plat avec billons cloisonnés sur les différents termes du bilan hydrique ont été suivis, de 1989 à 1991, sur le site expérimental de Gampela (Burkina Faso) et comparés à ceux de la technique traditionnelle de semis direct. Le labour à plat avec cloisonnement des billons accroît l'infiltration (de l'ordre de 20 %), ce qui peut entraîner, dans certains cas, des percolations non négligeables à la base du profil racinaire. Néanmoins, la reconstitution plus rapide et plus complète du stock d'eau de la zone racinaire permet une installation plus précoce des cultures, un meilleur enracinement et une sensibilité moindre à de courtes périodes sèches durant le cycle végétatif, avec un rendement accru de 30 %. L'efficacité de cette technique pourrait être améliorée par une fertilisation organique et minérale.