

Mécanisation de la technique du *zai* manuel en zone semi-aride

Albert Barro
Robert Zougmoré
Jean-Baptiste Sibiri Taonda

Institut de l'environnement
et de recherches agricoles (Inera),
04 BP 8645,
Ouagadougou 04,
Burkina Faso
<altbarro@yahoo.fr>

Résumé

Au Sahel, le *zai* est un système traditionnel de réhabilitation de la productivité des terres pauvres et encroûtées qui consiste à creuser manuellement des trous pour y concentrer les eaux de ruissellement et les matières organiques. En raison du temps de travail élevé en réalisation manuelle (plus de 300 heures/homme/ha), une étude de la mécanisation du *zai* en traction animale a été conduite sur des sols ferrugineux tropicaux au Burkina Faso (Saria, Pougyango). L'opération mécanisée a requis 36 heures/ha à Saria contre 22 heures/ha à Pougyango. L'effort moyen de traction à Saria était de 11,6 daN pour une profondeur de 7,8 cm et de 10,1 daN à Pougyango pour une profondeur de 11,6 cm. Les dimensions du trou de *zai* mécanique étaient les mêmes que celles du trou de *zai* manuel alors que la rugosité du sol a augmenté de 14,7 % avec le *zai* mécanique. La production de grains du sorgho était de 34 % supérieure à celle du *zai* manuel qui est d'environ 1 tonne en année normale au nord du pays. La mécanisation du *zai* a engendré un revenu positif atteignant 165 000 FCFA/ha¹ pour la culture du sorgho. Elle constitue une alternative intéressante d'augmentation significative du revenu des petits agriculteurs et aussi de préservation du milieu.

Mots clés : sols ; agronomie ; mécanisation et aménagement rural.

Abstract

Mechanizing the manual *zai* technique in semiarid areas

Manual *zai* practice is a traditional system used in the Sahel for the rehabilitation of degraded and crusted soils. It consists in manually digging pits that collect runoff water and receive a handful of organic resources. In view of the fact that manual *zai* is labour-intensive (300 heures-man/ha), the technique of mechanised *zai* using cattle traction has been studied on structurally degraded Lixisols in Burkina Faso (Saria, Pougyango). Labour time was reduced to 36 heures/ha at Saria and to 22 heures/ha at Pougyango. Animal traction force was 11.6 daN for 7.8 cm of tillage depth at Saria and 10.1 daN for 11.6 cm of tillage depth at Pougyango. Both mechanised and manual *zai* pits had the same sizes. Mechanised *zai* increased soil roughness by 14% while sorghum grain yield increase was 34% compared to that obtained with manual *zai*, which is approximately 1 ton in a normal year in the northern part of the country. The mechanization of the *zai* generated a significant income that could reach 165,000 F CFA/ha with sorghum cropping. It may therefore constitute an interesting alternative for increasing the income of the smallholders besides contributing to the preservation of the environment.

Key words: soils ; agronomy; mechanization and country planning.

Au Burkina Faso comme dans l'ensemble des pays du Sahel, les aléas climatiques conjugués aux actions anthropiques ont entraîné une dégradation sévère des terres agricoles [1].

Le stade ultime de cette dégradation consécutive à l'aridification du pédoclimat est l'apparition de terres dénudées quasi imperméables et stériles, localement appelés *zipellés* [2]. Dans ce pays, 24 % des terres arables sont fortement dégradées et menacent de nuire à la

Tirés à part : A. Barro

¹ 655,957 F CFA = 1 euro.

qualité du milieu naturel et à la sécurité alimentaire à moyen et long terme [3].

Pour réhabiliter ces terres dégradées, des producteurs ont mis au point la technique du *zai* manuel. C'est une méthode de culture en poquets réalisée manuellement à l'aide de pioches sur les *zipellés* [1, 4]. Sur le plan agronomique, cette technique endogène du Nord Burkina a fait ses preuves dans la région [5] et commence à gagner l'intérieur du pays, à la faveur de projets d'appui du secteur agricole. L'adoption de la technique est même progressivement observée avec succès dans d'autres pays de la sous-région, notamment au Mali et au Niger [6]. Cependant, la diffusion de la technique du *zai* en milieu paysan est ralentie en dépit de ses performances agronomiques avérées. Son adoption est limitée par nombre de contraintes dont l'une des principales est la forte demande en main-d'œuvre [7]. En effet, le temps de travail manuel est considérable (300 heures/homme/ha). De plus, l'opération qui se réalise en période sèche et chaude (40-45 °C) est pénible pour les paysans [1].

Les travaux de Le Thiec [8] et de Sédogo *et al.* [9] ont montré que les dents de travail du sol en sec RS8 et IR12 permettent un éclatement du sol et améliorent l'humectation du profil en début de cycle. Les dents de travail du sol en sec RS8 et IR12 sont des lames d'acier ayant respectivement 8 mm et 12 mm d'épaisseur et 50 cm de longueur, biseautées sur les deux bouts. Ces dents sont percées en leur milieu d'un trou permettant leur fixation sur un étançon. Elles sont destinées à intervenir sur des sols secs où, par cisaillement, des fissures et des mottes sont créées par le passage de l'attelage qu'elles équipent.

Ainsi, l'utilisation des dents de travail du sol en sec RS8 et IR12 en traction bovine pourrait contribuer à résoudre les problèmes de forte demande en main-d'œuvre et de pénibilité du travail. La présente étude a eu pour objectif d'évaluer les

performances agronomiques et économiques de la technique du *zai* mécanique dans les systèmes de culture à base de sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench). À cet effet, deux techniques de réalisation du *zai* mécanique ont été comparées au *zai* manuel et aux techniques classiques de scarifiage et de travail manuel à la *daba* (houe à manche court).

Matériel et méthode

Sites d'étude

L'étude a été réalisée dans deux sites : le site de Saria situé à 80 km à l'ouest de Ouagadougou (12° 16' N et 2° 9' W) et celui de Pougyango situé à 20 km à l'est de Yako (12° 59' N et 2° 9' W). À Saria, le climat est de type nord-soudanien [10]. La pluviosité moyenne annuelle des 20 dernières années est de 800 mm. On distingue une saison sèche de 7 mois et une saison des pluies qui dure 5 mois (juin-octobre).

À Pougyango, le climat est de type sahélien [10]. La pluviosité moyenne annuelle des 20 dernières années est de 630 mm. On distingue une saison sèche de 8 mois et une saison des pluies de 4 mois (juillet-octobre). Dans les deux sites, les pluies sont irrégulières dans l'espace et dans le temps, induisant des poches de sécheresse très souvent néfastes pour les cultures.

La végétation est de type savane arborée dans la zone de Saria avec comme principales espèces ligneuses *Parkia biglobosa*, *Acacia albida*, *Butirospermum paradoxo*. Le tapis herbacé est surtout composé de *Pennisetum* spp. et d'*Andropogon gayanus*. Le couvert végétal est plus dense que celui de Pougyango où dominent les espèces épineuses de type *Acacia* spp. Le tapis herbacé est formé surtout de *Loudetia togoensis*.

Le sol dans les deux sites est de type ferrugineux tropical [11]. La profondeur

moyenne du sol est de 40-50 cm à Saria et de 30-40 cm à Pougyango. Cette profondeur est limitée par la présence de cuirasse concrétionnée. Les pentes sont faibles (1 %). La texture est sablo-limoneuse avec 10 % de charge gravillonnaire à Saria et limono-argileuse à Pougyango (tableau 1). L'une des spécificités de ces sols est qu'ils sont entièrement dénudés, encroûtés en surface et très peu perméables à l'eau. Ils sont désignés par le nom local de *zipellé* qui signifie clairière.

Outre la différence de climat et de texture du sol entre les deux sites d'études, il faut noter que l'état de surface du *zipellé* est de type croûte d'érosion à Pougyango et de type croûte d'érosion modale à pelli-cule sableuse en surface à Saria [12, 13]. La croûte d'érosion est très imperméable à l'infiltration de l'eau tandis que la croûte d'érosion de type modale est relativement plus perméable.

Dispositif d'étude

Traitements

Le dispositif expérimental est un bloc Fischer à 3 répétitions et 5 traitements pour les deux sites. Chaque parcelle élémentaire fait 90 m², soit 6 m x 15 m. L'étude est conduite sur les mêmes parcelles en 2000 et en 2001. Les traitements étudiés sont :

- GRT : témoin, travail du sol par grattage manuel à la *daba* (pratique paysanne). L'opération est faite en général sur l'horizon de surface (2 à 3 cm de profondeur).
- SCA : scarifiage en traction animale au cultivateur (houe manga). Cette pratique est courante dans la plupart des régions Centre et Nord du pays à cause du faible effort de traction, de sa rapidité et de sa précocité de mise en œuvre. Elle peut servir de référence en termes de travail du sol dans les régions du Centre et du Nord du pays. L'opération est réalisée à une profondeur de 5 à 7 cm [14].
- Zm : *zai* manuel (traditionnel). Cette méthode consiste à creuser à la main des

Tableau 1. Texture, état de consistance, état de surface et profondeur utile du sol à Saria et à Pougyango

Table 1. Texture, consistency, top soil quality and soil useful depth at Saria and Pougyango.

Site	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Humidité (%)	État de consistance	État de surface	Profondeur utile (cm)
Saria	11,5	36,6	51,9	1,05	Dure	Croûte d'érosion (modale)	40
Pougyango	24,8	44,3	30,9	2,67	Dure	Croûte d'érosion	30

trous à l'aide de la *daba* et à y apporter du fumier ou du compost. Le travail est généralement réalisé en saison sèche (en avril). Les trous ont une profondeur moyenne de 10 à 15 cm et une largeur de 20 à 40 cm. La terre extirpée est disposée en croissant en aval du trou [15].

– ZME : *zai* mécanique avec extirpation de la terre des cuvettes ; les trous de *zai* sur ce traitement sont faits par le passage croisé à 90° d'un attelage bovin avec la dent RS8 à Saria ou IR12 à Pougyango. Après le passage croisé de l'attelage, la terre est dégagée des intersections et disposée en croissant en aval du trou comme dans le cas du *zai* manuel. La densité de semis est la même que celle du *zai* manuel.

– ZM : *zai* mécanique sans extirpation de la terre ; les trous de *zai* sont constitués par les intersections du passage croisé à 90° de l'outil de réalisation du *zai* mécanique tracté par un attelage bovin. La terre n'est pas extirpée des trous de *zai*. La densité de semis est la même que celle du *zai* manuel.

Un apport de fumier est effectué manuellement dans les trous de *zai* mécanique ou manuel. L'apport est fait sur les autres traitements, juste avant le scarifiage et le grattage à la dose de 5 t/ha afin de permettre un bon enfouissement. La dose est celle qui est recommandée par la recherche pour assurer le maintien de la production [16]. Cette dose correspond à un apport de 157 g de fumier par poquet pour un semis aux écartements de 0,8 m x 0,4 m. Le fumier a été apporté deux semaines avant le semis du sorgho. Dans la pratique des producteurs au Nord (Pougyango) où la pluviosité est plus faible, les écartements de semis du sorgho sont plus grands qu'à Saria (0,8 m x 0,6 m). Deux sarclages ont été faits à la *daba* en cours de cycle pour détruire les mauvaises herbes.

Mesures et observations

Les temps de travaux ont été mesurés sur chaque parcelle (3 répétitions) pendant la réalisation des opérations. L'effort de traction a été mesuré à l'aide d'un dynamomètre mécanique à maxima monté entre l'outil de travail du sol et les bœufs de trait à raison de 30 répétitions par traitement. La texture du sol a été déterminée au laboratoire par la méthode de la pipette Robinson sur un échantillon composé à partir de trois prélèvements par parcelle sur l'horizon 0-20 cm. L'humidité du sol a été mesurée par prélèvement d'échantillons sur l'horizon 0-10 cm en 3 répétitions dans les espaces hors des

sillons de passage de l'outil et hors des cuvettes de *zai*. Les dimensions des trous de *zai* ont été mesurées à l'aide de tige métallique graduée et de mètre ruban à raison de 30 répétitions par traitement. Les trous sont choisis de façon aléatoire sur l'ensemble de la parcelle. La largeur du trou est mesurée sur l'axe passant en son centre et faisant 45° avec chaque sillon.

La rugosité a été mesurée par la méthode de la chaînette [17]. La chaînette, de 1,045 m de longueur, est déposée à la surface du sol de sorte qu'elle épouse le micromodèle de surface en passant dans les trous de *zai*. La projection verticale de la chaînette (*lo*) est alors mesurée avec un mètre-ruban (30 répétitions). L'indice de rugosité (*Irug*) est le rapport L/lo , avec *L* = longueur réelle de la chaînette. La résistance du sol à la pénétration est mesurée entre les poquets en 2 répétitions par le pénétromètre à percussion. La profondeur du front d'humectation a été mesurée sur les parcelles de *zai* dans le trou et hors du trou en procédant à l'ouverture d'un profil cultural sur les parcelles à raison de 3 répétitions par parcelle. Les mesures sont effectuées le lendemain des jours pluvieux durant le premier mois du début de la saison des pluies.

La caractérisation du système racinaire a été faite par comptage du nombre d'impacts racinaires en 2 répétitions, selon la méthode de la grille [9, 18]. Un modèle empirique reliant le nombre d'impacts à la longueur racinaire a été utilisé pour mesurer la colonisation du profil [14]. Le calcul des coûts de la mécanisation a été fait en prenant en compte l'alimentation et les soins vétérinaires des animaux, l'amortissement du matériel, l'usure des pièces mises à contribution, et la main-d'œuvre pour la mise en œuvre d'un attelage bovin avec le bâti porteur du corps de labour. Les coûts des différentes opérations culturales ont été estimés grâce aux mesures des temps de travaux. La paille a été évaluée à 15 F CFA/kg² et le grain à 140 F CFA/kg [19]. Le ratio revenu/coût (RV/C) a été calculé pour les traitements du *zai* en prenant comme référence le traitement du scarifiage. Ce ratio est le revenu additionnel rapporté au coût additionnel du traitement. Le revenu additionnel est déterminé par rapport au revenu du traitement scarifiage. Le coût additionnel est

² 655,957 F CFA = 1 euro.

le coût supplémentaire lié à l'usage du *zai* manuel ou mécanique par rapport au scarifiage. Le chiffre obtenu indique ce que le franc supplémentaire investi rapporte au producteur.

Le logiciel Statitcf a été utilisé pour l'analyse de variance et le test de Newman-Keuls pour établir les différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 0,05.

Résultats

État physique initial du sol

Au moment de la mise en place des traitements de *zai* manuel et mécanique sur les deux sites, l'humidité du sol n'était que de 1,5 % à Saria et de 2,7 % à Pougyango. Le sol était à la consistance dure (*tableau 1*). Ces faibles humidités ont été induites par les toutes premières pluies du mois de mai, soit 43,7 mm à Saria et 72,6 mm à Pougyango. La profondeur utilisable par les racines est limitée à 30 cm à Pougyango et à 40 cm à Saria. En effet, une cuirasse ferrugineuse apparaît à 30 cm de profondeur.

Dimensions des trous, effort de traction et temps de travaux

Le *tableau 2* montre les paramètres de réalisation des opérations de travail du sol dans les deux sites d'étude. À Saria, la profondeur des trous du *zai* manuel était plus élevée que celle des trous de *zai* mécanique (avec ou sans extirpation de terre). La profondeur des trous du *zai* mécanique avec extirpation de terre était du même ordre que celle du *zai* mécanique sans extirpation de terre. La profondeur des trous de *zai* manuel était significativement différente de celle des trous de *zai* mécanique. Contrairement à Saria, les trous de *zai* mécanique (avec ou sans extirpation de terre) à Pougyango étaient plus profonds que ceux du *zai* manuel. En outre, la profondeur des trous du *zai* mécanique avec extirpation de terre était significativement plus élevée que celle du *zai* mécanique sans extirpation de terre. En moyenne, les profondeurs des trous de *zai* mécanique (avec ou sans extirpation de terre) à Pougyango étaient plus élevées que celles obtenues à Saria. En effet, les trous de *zai* mécanique étaient plus profonds à Pougyango qu'à Saria de

Tableau 2. Dimensions des trous de *zai*, temps des travaux et effort de traction à Saria et à Pougyango

Table 2. Size of *zai* pits, labour time and traction force at Saria and Pougyango.

Sites	Traitements	Profondeur (cm)		Largeur (cm)		Temps de travaux (h/ha)		Effort moyen de traction (daN)
		2000	2001	2000	2001	2000	2001	
Saria	Zm	11,9 a	11,3 a	31,7 a	29,9 a	468,4 a	-	-
	ZME	9,8 b	7,3 b	29,5 a	23,6 b	32,4 b	41,3 a	12,1 a
	ZM	7,1 c	7,0 b	24,7 b	21,9 c	28,0 b	41,4 a	11,2 a
Pougyango	Zm	11,2 a	10,8 c	40,9 a	38,2 a	370,3 a	407,8 a	-
	ZME	10,6 ab	13,2 a	39,3 a	37,3 a	19,8 b	23,5 b	9,9 a
	ZM	10,3 b	12,4 b	39,4 a	36,3 a	18,8 b	24,7 b	10,3 a

Les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents à la probabilité $p = 0,05$; Zm : *zai* manuel ; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre ; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre ; - : donnée inexistante.

2 cm en 2000 et de 5,7 cm en 2001. En revanche, la profondeur des trous de *zai* manuel était pratiquement identique pour les deux sites.

À Saria, le diamètre le plus élevé des trous était observé sur le traitement *zai* manuel suivi du *zai* mécanique avec extirpation de terre, puis du *zai* mécanique sans extirpation de terre. Les diamètres des trous n'étaient pas significativement différents à Pougyango. Toutefois, on a pu observer le même classement par ordre croissant qu'à Saria, à savoir : le *zai* manuel, le *zai* mécanique avec extirpation de terre et le *zai* mécanique sans extirpation de terre. Les trous de *zai* étaient en moyenne plus larges à Pougyango qu'à Saria.

Rugosité du sol et évolution du front d'humectation

L'indice de rugosité du sol avant le passage des outils était faible et identique à Pougyango et Saria (tableau 3). L'analyse de variance a montré qu'à Saria la rugosité induite par le *zai* manuel était significativement plus importante que celle

induite par le *zai* mécanique, tandis qu'à Pougyango la rugosité du sol n'était pas significativement différente entre les deux types de *zai* (tableau 3).

Les aspérités observées après les passages croisés de la dent de travail du sol en sec étaient plus importantes que celles obtenues après la réalisation du *zai* manuel. Ces aspérités, en ce qui concerne les traitements de *zai* mécanique, étaient effectives sur les lignes de passage de la dent et constituaient un réseau anastomosé de mottes dans les sens perpendiculaire et parallèle à la pente du terrain (figure 1). En revanche, sur le *zai* manuel, le micro relief était ponctuel et constitué du déblai de terre déposée juste en aval du trou de *zai* (figure 2). Ce micro relief n'est pas continu comme c'est le cas pour le *zai* mécanique.

L'analyse de variance n'a pas révélé de différences significatives entre les traitements pour la profondeur du front d'humectation à Saria (figure 3A). Toutefois, ce front était significativement plus profond dans les trous que hors des trous de *zai* manuel, soit en moyenne 33 cm dans les trous et 22,4 cm hors des trous.

En revanche, pour le *zai* mécanique (avec ou sans extirpation de terre), les profondeurs de front d'humectation dans les trous et hors des trous étaient presque similaires, la profondeur de sol mouillée étant en moyenne de 27 cm dans les trous contre 25 cm hors des trous.

À Pougyango, la profondeur de sol humectée était significativement différente entre les traitements (figure 3B et 3C). Le front d'humectation le plus profond était observé sur le traitement *zai* mécanique sans extirpation de terre, suivi du *zai* mécanique avec extirpation de terre et du *zai* manuel. L'évolution du front d'humectation s'est poursuivie selon cette tendance après les quatre pluies suivant le travail du sol. Le front d'humectation dans les trous était plus profond qu'en dehors des trous pour tous les traitements *zai*.

Résistance du sol à la pénétration et développement du système racinaire

À Saria, la résistance du sol la plus faible a été observée sur les parcelles de grattage manuel à la daba (figure 4A). Les quatre autres parcelles avaient une résistance supérieure à celles des parcelles de Pougyango.

À Pougyango, la résistance du sol à la pénétration la plus élevée était observée sur le *zipellé*, suivi des parcelles de grattage et de scarifiage puis des parcelles de *zai* manuel et mécanique (figure 4B). Cette résistance du sol à la pénétration a été réduite de moitié après la réalisation du *zai* mécanique et du *zai* manuel, passant de 500 Pa sur le *zipellé* contre

Tableau 3. Rugosité du sol à Saria et à Pougyango en 2001

Table 3. Soil roughness at Saria and Pougyango in 2001.

Sites	Traitements	Irug avant travail du sol	Irug après travail du sol	Taux d'accroissement (%)
Saria	Zm	1,036	1,28 a	23,43 a
	ZME		1,11 b	6,95 b
Pougyango	Zm	1,038	1,19 a	14,55 a
	ZME		1,18 a	13,74 a

Les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents à la probabilité $p = 0,05$; Irug : indice de rugosité du sol ; Zm : *zai* manuel ; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre.



Figure 1. Rugosité du *zai* mécanique sur *zipellé* à Pougyango (Yako) Burkina Faso (présence de grosses mottes).

Figure 1. Soil roughness of the mechanical *zai* on *zipellé* at Pougyango (Yako) Burkina Faso (existence of large clods).



Figure 2. Rugosité du *zai* manuel sur *zipellé* à Pougyango (Yako) Burkina Faso (présence de trous et de terre fine).

Figure 2. Soil roughness of the manual *zai* on *zipellé* at Pougyango (Yako) Burkina Faso (existence of pits and pulverized soil).

seulement 200 Pa sur tous les traitements *zai* (manuels et mécaniques).

À Saria (figure 5A) comme à Pougyango (figure 5B), il n'y a pas eu de différence

significative de longueur racinaire entre *zai* mécanique et manuel. On note cependant qu'à Pougyango, les traitements *zai* mécaniques ont induit un développement du système racinaire plus important que le *zai* manuel dans les 20 premiers centimètres. Le développement du système racinaire y était aussi plus important que celui du site de Saria.

Production du sorgho et évaluation des revenus

À Saria, la production de paille en 2000 était significativement différente entre le traitement GRT (2,3 t/ha) et les autres traitements (3,1 t/ha). Elle n'était pas significativement différente entre traitements en 2001, mais le niveau général de la production était faible avec une tendance des traitements SCA, Zm et ZME à être supérieure aux traitements GRT et ZM (tableau 4).

Sur le site de Pougyango, la production de paille en 2000 et 2001 était significativement différente entre les traitements de *zai* et les autres traitements. La comparaison des moyennes a fait ressortir deux groupes : le premier groupe comprend les traitements de *zai* et le second groupe les traitements de grattage et de scarifiage. Les traitements de *zai* ont obtenu en moyenne 2,2 t/ha de paille en 2000 et 3 à 5 t/ha en 2001. Les autres traitements ont produit en moyenne 0,8 t/ha de paille en 2000 et 1,0 t/ha en 2001. Au cours des deux années, le *zai* mécanique avec extirpation de terre (ZME) a montré le rendement de paille le plus élevé, suivi du *zai* mécanique sans extirpation de terre (ZM) et du *zai* manuel (Zm) (tableau 4).

À Saria, la production de grain en 2000 n'était pas significativement différente entre les divers traitements. En revanche, en 2001, les rendements en grains des parcelles de *zai* manuel, de *zai* mécanique avec extirpation de terre et de scarifiage ont été supérieurs (1,5 t/ha) à ceux des parcelles de *zai* mécanique sans extirpation de terre et de grattage manuel (1,2 t/ha). Le niveau de production était plus faible que celui de l'année 2000, mais les tendances observées se sont mieux exprimées en 2001 (tableau 4).

À Pougyango, la production de grains était significativement différente entre les traitements pour les deux années. Le *zai* mécanique avec extirpation de terre était le plus productif avec 0,6 t/ha en 2000 et 1,4 t/ha en 2001, suivi du *zai* mécanique sans extirpation avec 0,4 t/ha en 2000 et

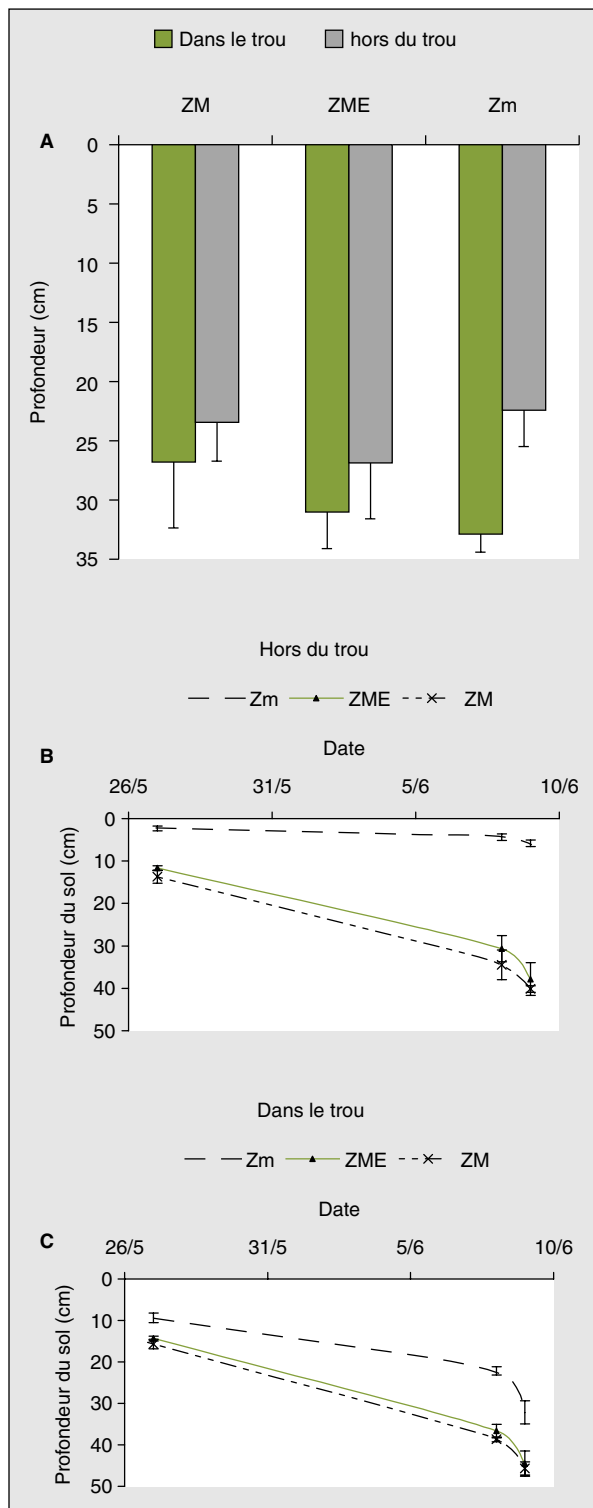


Figure 3. Évolution de la profondeur du front d'humectation du sol en début de saison pluvieuse après la réalisation des *zai*; A) Profondeur du front d'humectation du sol à la date du 26 mai 2001 à Saria. B) Évolution du front d'humectation du sol dans les trous de *zai* à Pougnyango. C) Évolution du front d'humectation du sol hors des trous de *zai* à Pougnyango.

Figure 3. Evolution of soil moisture layer depth at the beginning of rainy season after *zai* practice. A) depth of soil moisture layer at May 26 of 2001 at Saria; B) evolution of soil moisture layer in *zai* pits at Pougnyango; C) evolution of soil moisture layer out of *zai* pits at Pougnyango.

Zm : *zai* manuel ; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre du trou ; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre du trou.

1,3 t/ha en 2001, puis du *zai* manuel avec 0,4 t/ha en 2000 et 1,1 t/ha en 2001. Le scarifiage et le grattage ont obtenu les plus faibles rendements avec une moyenne de 0,2 t/ha en 2000 et de 0,3 t/ha en 2001 (tableau 4).

L'évaluation économique du *zai* mécanique et du *zai* manuel est présentée au tableau 5. Le traitement de *zai* mécanique avec extirpation de terre a obtenu le revenu le plus élevé, suivi du *zai* mécanique sans extirpation de terre et du *zai* manuel.

Discussion

Préparation du sol et dimensions des trous de *zai*

La capacité d'un sol à l'état de consistance dure à créer des fissures et des mottes lors de son cisaillement, a été expérimentée à Gampèla par Herblot en 1984 [20]. Les travaux ont été poursuivis à Saria en 1989 par Barro [21, 22] et Sédogo *et al.* [23]. Ces travaux ont montré que les sols de Saria, comme la plupart des sols du Burkina, sont à l'état de consistance dure en dessous du taux d'humidité pondérale de 10 % [24]. Au moment de la réalisation du *zai* mécanique sur les parcelles, l'humidité du sol était de 1,05 % à Saria et de 2,67 % à Pougnyango (tableau 1). L'état de consistance du sol était optimal pour réaliser des fissures et créer des mottes par cisaillement.

L'indice de rugosité, après réalisation du *zai* manuel, était, à Saria, supérieur à celui de Pougnyango. Cette différence serait liée aux écartements entre poquets qui étaient plus faibles à Saria (40 cm) qu'à Pougnyango (60 cm). En revanche, la réalisation du *zai* mécanique à la station de Saria a créé une rugosité plus faible car le sol est gravillonnaire. En plus de cet aspect, la dent de 8 mm d'épaisseur induit un éclatement plus faible que celle de 12 mm d'épaisseur. Ce sont les contraintes de force de traction des animaux qui conduisent à son usage en sol cohérent. L'action des dents de travail du sol en sec a engendré un éclatement important à Pougnyango, comme le montrent les taux d'accroissement des indices de rugosité du *zai* mécanique (14 % à Pougnyango contre 7 % à Saria). Le *zai* mécanique a induit à Pougnyango une rugosité deux

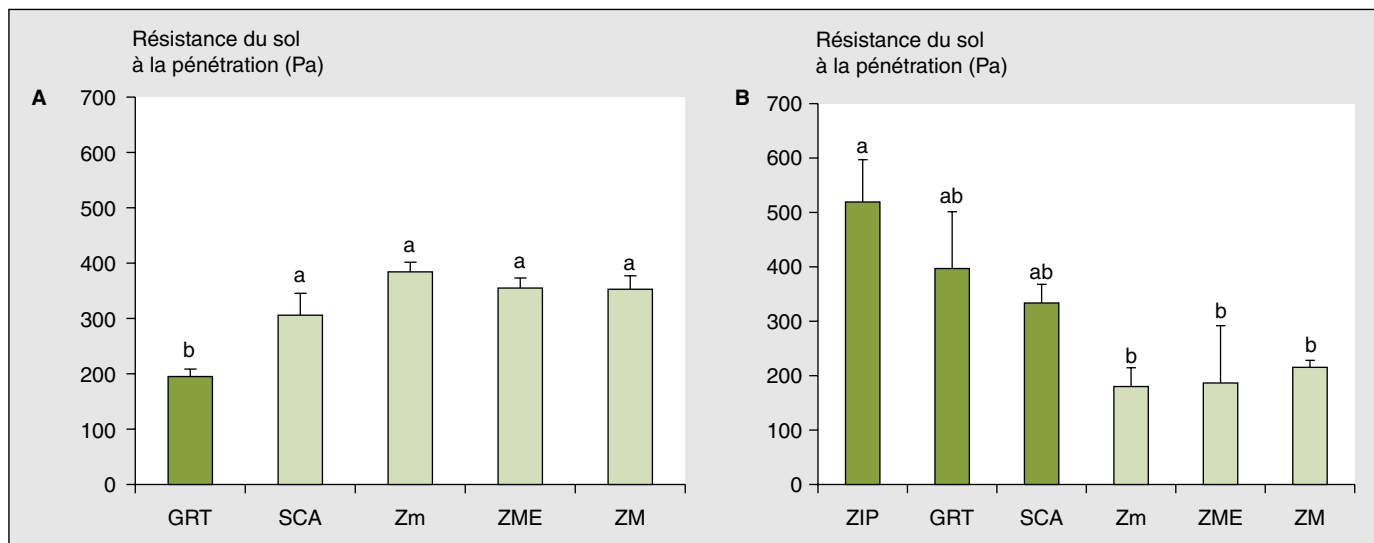


Figure 4. Résistance du sol à la pénétration en 2001. A) site de Saria ; B) site de Pougyango.

Figure 4. Soil resistance to the penetration test in 2001. A) site of Saria; B) site of Pougyango..

Les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents à la probabilité $p = 0,05$; GRT : grattage manuel ; SCA : scarifiage ; Zm : *zai* manuel ; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre du trou ; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre du trou.

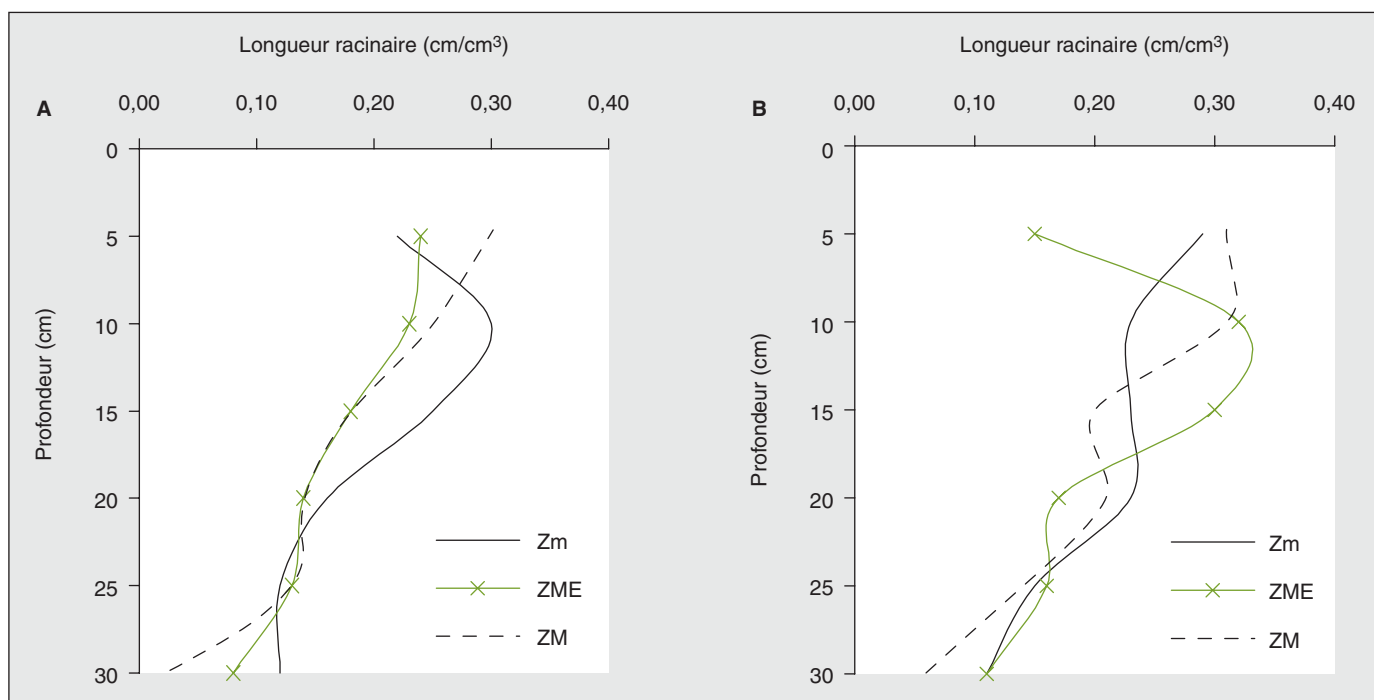


Figure 5. Développement du système racinaire sur les traitements *zai*. A) site de Saria ; B) site de Pougyango.

Figure 5. Crop roots development on the *zai* treatments. A) site of Saria; B) site of Pougyango.

Zm : *zai* manuel ; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre du trou ; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre du trou.

fois plus importante que sur le même traitement à Saria à cause de la texture plus argileuse du sol. L'argile augmente la cohésion du sol à taux d'humidité

identique et les plans de cisaillement générés par les contraintes liées au passage de la dent étant plus écartés, les mottes sont plus grosses [25].

Après le passage des outils, les largeurs de trous de *zai* manuel et mécanique étaient les mêmes à Pougyango en première année. La profondeur du trou de

Tableau 4. Effet des traitements sur le rendement en grains et paille du sorgho à Saria et à Pougyango (t/ha)

Table 4. Effect of the treatments on sorghum grain and straw yield at Saria and at Pougyango (t/ha).

	Année 2000				Année 2001			
	Saria		Pougyango		Saria		Pougyango	
Pluviosité (mm)	799		569		702		746	
Traitement	paille	grains	paille	grains	paille	grains	paille	grains
GRT	2,3 b	1,2 a	0,9 bc	0,2 b	1,6 a	0,7 b	0,8 b	0,2 b
SCA	3,2 a	1,4 a	0,6 c	0,2 b	2,8 a	1,5 a	1,3 b	0,4 b
Zm	3,3 a	1,7 a	2,0 ab	0,4 ab	2,4 a	1,6 a	3,0 a	1,0 a
ZME	3,1 a	1,2 a	2,6 a	0,6 a	2,5 a	1,5 a	5,0 a	1,4 a
ZM	3,1 a	1,3 a	2,1 ab	0,4 ab	1,5 a	0,8 b	4,9 a	1,4 a

Les traitements ayant la même lettre ne sont pas significativement différents à la probabilité $p = 0,05$; GRT : grattage manuel à la *daba*; SCA : scarifiage à la houe manga (cultivateur); Zm : *zai* manuel; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre du trou.

Tableau 5. Évaluation économique des traitements à Pougyango (F CFA/ha)

Table 5. Economic evaluation of the treatments at Pougyango (F CFA/ha).

	Témoïn	Scarifiage	Zm	ZME	ZM
Coût travail du sol	0	3 000	55 000	26 900	15 000
Coût total	58 333	69 003	166 698	93 659	76 790
Recette sur grains	29 820	49 560	146 160	201 740	191 380
Recette sur paille	12 668	14 220	37 808	56 970	52 748
Revenu total	42 488	63 780	183 968	258 710	244 128
Bénéfice (revenu-coût)	- 15 846	- 5 223	17 270	165 051	167 337
Coût additionnel lié à la réalisation de la technique	-	0	52 000	23 900	12 000
Revenu additionnel total	-	0	120 188	194 930	180 348
(Revenu/coût) RV/C	-	-	2,31	8,16	15,03

Zm : *zai* manuel; ZME : *zai* mécanique avec extirpation de terre; ZM : *zai* mécanique sans extirpation de terre du trou; RV/C : ratio revenu additionnel/coût additionnel lié à l'application de la technique; 655,957 F CFA = 1 euro.

zai manuel était légèrement supérieure à celle du trou de *zai* mécanique (tableau 2). La même année, à Saria, on observe que le *zai* mécanique sans extirpation de terre n'était pas aussi efficace que le *zai* manuel pour la largeur et la profondeur du trou. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la pratique du *zai* manuel n'était pas connue des producteurs et par l'état gravillonnaire du sol qui le rend très cohérent en saison sèche et chaude.

En seconde année (2001), la profondeur des trous de *zai* mécanique était supérieure à celle des trous de *zai* manuel. Cela s'explique par une baisse de la résistance du sol à la pénétration, consécutive aux effets cumulés des interventions en première et deuxième année (figure 4B). En seconde année, à Saria, les tendances observées en première année sont confirmées. Malgré les mesures prises pour permettre aux opérateurs de respecter les

dimensions des trous de *zai* manuel, les trous réalisés à Saria étaient de largeur et de profondeur inférieures à ceux de Pougyango. Cela s'expliquerait par la forte résistance du sol à la pénétration des parcelles de *zai* à Saria (figure 4A).

Les travaux de Costet et Sanglérat [26] ont montré que la cohésion du sol diminue fortement quand l'humidité augmente. La cohésion du sol des sites a induit un effort de traction de 11,6 daN à Saria pour une profondeur de 7,8 cm et de 10,1 daN à Pougyango pour une profondeur de 11,6 cm. La différence d'effort de traction est due à la différence de cohésion. Malgré la faible profondeur de travail et la moindre épaisseur de la dent RS8, l'effort de traction a été de 15 % supérieur à celui de l'opération avec la dent IR12 à Pougyango. La résistance à la pénétration était de 350 à 400 Pa à Saria alors que cette résistance n'était que de 200 Pa à Pougyango. En plus de la baisse de la

résistance du sol à la pénétration dans le poquet de *zai* manuel aussi observé par Zombré *et al.* [27], le *zai* mécanique ameublait toute la parcelle. Le passage de la dent éclate le sol en continu sur une bande de 20 à 30 cm de largeur, alors que le trou du *zai* manuel est localisé en un point de la parcelle (figures 1 et 2). La faible largeur des trous de *zai* manuel à Saria traduit la difficulté plus grande de leur réalisation à la main.

Les travaux de Roose *et al.* [1] et de Ouédraogo et Kaboré [4], ont montré que le *zai* manuel demande à un homme 300 heures de travail par hectare pour la seule réalisation des trous. Par conséquent, la main-d'œuvre utilisée est importante [28]. Les temps de travaux mesurés dans cette étude sont de 30 % supérieurs à la moyenne de 300 heures/ha citée. La réalisation du *zai* mécanique qui ne nécessite que 22 heures/ha (passage de l'outil pour la création des poquets avec

un attelage bovin) est nettement plus rapide que l'opération manuelle.

Au regard des paramètres de mise en œuvre et des dimensions des trous obtenus, l'expérience montre que le *zai* traditionnellement réalisé à la main, peut être mécanisé. Cette mécanisation facilite le travail des paysans et leur permet de produire sur des surfaces de sols dégradés plus importantes. La technique est à la portée de tous les paysans qui possèdent un attelage et un outil (buteur, charrue, houe manga, houe sine). L'opération doit être réalisée quand le sol est à l'état de consistance dure. L'expérience montre toutefois que tout en restant dans cet état de consistance (humidité inférieure à 10 %), il faut éviter de travailler un sol trop sec dont la cohésion du sol est en général très forte [26], afin d'avoir les meilleurs résultats en termes d'effort de traction et de dimension des trous.

Plus efficace que la technique du *zai* manuel, la mécanisation du *zai* améliore la profondeur du front d'humectation en début de cycle à Pougyango. Cela s'explique par le fait que la rugosité des parcelles de *zai* manuel n'est pas du même type que celle du *zai* mécanique. Sur la parcelle de *zai* manuel, il existe des zones dénudées qui n'ont pas été touchées par l'opération de travail du sol. Ducreux et Manière ont montré que l'outil de travail du sol en sec pendant son passage, engendre dans le sol des fissures qui descendent au-delà de la profondeur de travail [25], ce qui est favorable au développement du système racinaire. On constate ainsi que, sur toutes les parcelles de *zai* mécanique, la longueur racinaire est supérieure ou égale à celle des parcelles en *zai* manuel. Cela confirme le bénéfice lié au *zai* mécanique.

Production du sorgho et revenu du paysan

Le système racinaire de la culture du sorgho sur les parcelles de *zai* manuel et mécanique, est l'équivalent de celui généré par un labour dans les conditions de sols non dénudés [29]. Un système racinaire bien développé augmente le taux d'exploitation du sol. Les nutriments du sol, même à un taux faible, sont alors rendus plus disponibles pour les plantes. De plus, le développement d'un tel système racinaire accroît le taux de matière organique du sol, les racines y restent après la récolte. Cet effet est important pour la réhabilitation des sols dégradés. D'après les travaux de Chopart au Séné-

gal [29] et le modèle empirique de Barro [14], un tel système racinaire apporte environ 0,6 t/ha de matière organique au sol qui favorise la création de structure agrégée dans le sol et augmente la porosité et par conséquent la perméabilité. Un tel sol favorise l'alimentation hydrique et minérale des plantes. La production s'en trouve améliorée.

Sur le site de Saria, l'effet du *zai* s'exprime quand la pluviosité est faible (cas de 2001). Les traitements les plus productifs sont ceux qui ont permis une rétention du fumier. Il s'agit du scarifiage, du *zai* manuel et du *zai* mécanique avec extirpation de terre (tableau 4). L'opération de scarifiage recouvre le fumier épandu avant le passage de la houe manga. Les traitements *zai* manuel (Zm) et *zai* mécanique avec extirpation de terre (ZME) créaient des trous suffisamment profonds pour retenir le fumier du fait de l'extirpation et de la disposition de la terre en croissant en aval du poquet. Le grattage manuel qui est une opération de travail superficiel du sol ne permet pas d'enfouir et de garder le fumier dans le sol. Le *zai* mécanique sans extirpation de terre (ZM) ne crée pas une cuvette suffisante pour retenir le fumier. Sur ce site, la production est plus liée à l'amélioration de l'alimentation minérale qu'à la gestion de l'eau par la technique du *zai*. La texture sableuse du sol lui donne une perméabilité satisfaisante.

À Pougyango, l'effet combiné de la gestion de l'eau et de l'amélioration de l'alimentation minérale a entraîné une supériorité des traitements *zai* par rapport au grattage et au scarifiage. Les *zai* mécaniques (ZME et ZM) permettent la meilleure production de paille et de grains grâce à l'ameublissement du sol et à la profondeur du front d'humectation en début de cycle. En absence de la technique du *zai* sur ce *zipellé*, la production est du même ordre (200 kg/ha) en année à pluviosité normale (569 mm) ou forte (746 mm) ; ainsi la gestion de l'eau par la technique du *zai* est primordiale pour la mise en valeur de ces sols très encroûtés et imperméables en surface [2, 3, 30]. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus avec la technique de la demi-lune sur le même site [31] où la combinaison demi-lune et matières organiques (fumier, compost) avait produit plus de 1,5 t/ha de grains de sorgho.

Le *zai* mécanique sans extirpation de la terre a le meilleur revenu car la production de grains et de paille est la plus importante (tableau 5). Le revenu le plus

faible est obtenu sur le témoin. En termes de bénéfices, la technique seule du *zai* mécanique permettrait un gain substantiel d'au moins 165 000 F CFA/ha. Cela est dû d'une part à la main-d'œuvre importante utilisée dans la réalisation du *zai* manuel et, d'autre part, à la faible production de grain et de paille sur les parcelles témoins et de scarifiages. Le faible bénéfice observé sur la pratique du *zai* manuel est lié au coût très élevé de la main-d'œuvre nécessaire sa réalisation (plus de 300 heures/ha). L'impression de gain d'argent que les producteurs ont quand ils pratiquent le *zai* manuel est liée à la sous-évaluation du coût de la main-d'œuvre très souvent peu ou mal rémunérée, car elle est essentiellement d'origine familiale. Le franc supplémentaire investi rapporte 15 fois plus pour la technique du *zai* mécanique (tableau 5) alors que pour le *zai* manuel le franc supplémentaire investi ne rapporte que 2 francs. La rentabilité de la technique mécanique est alors très importante pour le petit producteur du Sahel. En 1994, la superficie des terres dégradées était de 16 000 hectares dans la région Nord du Burkina Faso [3, 32]. L'exploitation de 3 000 hectares, soit 19 % de ces terres, avec le *zai* mécanique, induirait un bénéfice de 495 à 502 millions de F CFA pour les paysans. En plus de l'accroissement du revenu des paysans, cette technique, qui augmente la perméabilité du sol, pourrait contribuer à la recharge des nappes, paramètre non évalué dans cette étude. La technique du *zai* mécanique pourrait être mieux valorisée si la capacité de traction de l'attelage et la disponibilité du fumier et/ou du compost étaient améliorées par des mesures d'accompagnement. La faible capacité de traction des animaux est liée pour une part à leur mauvaise alimentation, les producteurs ne pratiquant pas la culture fourragère et n'apportant pas de produits de fauche aux animaux ; par ailleurs, le système de harnachement des animaux est souvent inadapté et les blesse. Des mesures de formation et d'animation visant à disposer pour les travaux agricoles d'animaux bien nourris et en bonne santé équipés d'un bon système de harnachement, permettraient d'avoir une capacité de traction supérieure. Le manque d'eau est aussi un facteur limitant pour la fabrication du compost. La multiplication des points d'eau permettrait au producteur d'obtenir un compost de qualité qui aurait une incidence importante sur la fertilité du sol, et donc sur la production.

Glossaire

GRT : travail du sol par grattage manuel à la *daba*
SCA : scarifiage
Zm : *zaï* manuel
ZME : *zaï* mécanique avec extirpation de terre du trou
ZM : *zaï* mécanique sans extirpation de terre du trou
Irug : indice de rugosité du sol
Inera : Institut de l'environnement et de recherches agricoles (Burkina Faso)
CES/AGF : Programme spécial de conservation des eaux et des sols et d'agroforesterie
GRN/SP Centre : Programme Gestion des ressources naturelles et systèmes de production du Centre
RS8 : dent de travail du sol en sec réversible avec 8 mm d'épaisseur
IR12 : dent de travail du sol en sec « Inera réversible » avec 12 mm d'épaisseur

Conclusion

Cette étude a montré que la mécanisation du *zaï* améliore les performances de la technique endogène manuelle. La perméabilité du sol est augmentée, ce qui favorise une humectation du sol et une bonne utilisation des éléments minéraux apportés par le compost. La production de grains et de paille est améliorée. Le *zipellé* est réhabilité après deux années de pratique du *zaï* mécanique.

L'accroissement du revenu des producteurs peut atteindre 165 000 F CFA/ha avec une culture de sorgho et la réduction importante des temps de travaux pourrait permettre aux producteurs d'avoir du temps pour réaliser d'autres activités qui viendraient accroître le gain de l'exploitation. La pratique du *zaï* homogénéise les sols traités et sécuriserait de ce fait la production par son efficacité sur la gestion de l'eau, en limitant l'effet néfaste de la sécheresse sur des secteurs localisés du champ. La gestion de l'eau a aussi des effets positifs sur le patrimoine foncier qui est préservé de l'érosion. De plus, cette meilleure gestion des eaux de surface pourrait aussi améliorer la recharge des nappes d'eau souterraines. La pratique mécanique du *zaï* est cependant limitée par la capacité de traction des animaux de traits qui pourrait être améliorée par une

meilleure alimentation et un système de harnachement efficace. Le développement et la diffusion du *zaï* mécanique pourraient contribuer à la restauration et à la préservation de l'écosystème sahélien et ainsi permettre de lutter de façon efficace contre la pauvreté. ■

Remerciements

Les auteurs remercient le programme spécial Fida de Conservation des eaux et des sols et d'agroforesterie (CES/AGF) au Burkina Faso pour avoir financé les travaux. Ils remercient les techniciens du programme Gestion des ressources naturelles et systèmes de production du centre (GRN/SP) de l'Inera-Saria – Saidou Simporé, Moctard Ouédraogo, Martin Zongo, et feu Adama Zongo – pour la collecte des données, ainsi que les producteurs de Pougyango pour leur collaboration exemplaire lors de la réalisation de l'étude.

Références

1. Roose E, Kaboré V, Guenat C. Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; XXVIII : 159-73.
2. Kambou NF, Zougmore R. Évaluation des états de surface d'un *zipellé* soumis à différents techniques de restauration des sols (Yilou, Burkina Faso). *Bull Erosion* 1995 ; 6 : 19-32.
3. Kambou NF, Taonda S JB, Zougmore R, Kaboré B, Dickey J. Effet des pratiques de conservation des sols sur l'évolution de la sédimentation des états de surface et des rendements de mil d'un site érodé à Yilou, Burkina Faso. In : Lowenberg-Deboer J, Boffa JM, Dikey J, Robins E, eds. *La recherche intégrée en production agricole et gestion des ressources naturelles*. West Lafayette (Etats-Unis) : Purdue University, 1994.
4. Ouédraogo M, Kaboré V. Le *zaï*, technique traditionnelle de réhabilitation des terres dégradées au Yatenga (Burkina Faso). In : Reij C, Scoones I, Toulmin C, eds. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. Paris ; Amsterdam ; Wageningen : Karthala ; CTA ; CDSC, 1996.
5. Reij C, Scoones I, Toulmin C. *Sustaining the soil : indigenous soil and water conservation in Africa*. London : Earthscan, 1996.
6. Rochette MR. *Le Sahel en lutte contre la désertification, leçons d'expériences*. Weibersheim Margraf : Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS)-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1989.
7. Kaboré TS. *Innovations techniques et efficacité économique dans les systèmes de production des provinces du Bulkiémdé et du Sanguié au Burkina Faso*. Thèse de 3^e cycle, faculté des sciences économiques et de gestion, Côte d'Ivoire, 1996.
8. Le Thiec G. Le coutrier à traction animale : recherche alternative au labour en région sèche. *Les Cahiers de la Recherche Développement* 1990 ; 28 : 83-6.
9. Tardieu F, Manichon H. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. *Agronomie* 1986 ; 6 : 345-54.
10. Guinko S. *La végétation de Haute Volta*. Tomes 1 et 2. Doctorat d'État ès sciences naturelles, université de Bordeaux II, 1984.
11. Commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS). *Classification des sols*. Paris : CPCS, 1967.
12. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Bondy : Orstom éditions, 1989.
13. Casenave A, Valentin C. A run-off capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa. *J Hydrol* 1992 ; 130 : 231-49.
14. Barro A. *Évaluation de l'effet et de la faisabilité du travail du sol sur le sorgho photosensible à Saria (Burkina Faso)*. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'agriculture de Montpellier (Ensam), École doctorale de biologie intégrative, 1999.
15. Zougmore R, Ouattara K, Mando A, Ouattara B. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, *zaï* et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 41-8.
16. Sédogo PM. *Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité*. Thèse de doctorat ès sciences, université nationale de Côte d'Ivoire, 1993.
17. Boiffin J. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de docteur-ingénieur, Institut national agronomique de Paris-Grignon (INAPG), Paris, 1984.
18. Bohm W. *In situ* estimation of root length at natural soil profiles. *J Agric Comb* 1976 ; 87 : 365-8.
19. Zougmore R, Mando A, Stroosnijder L. Economic benefits of combining soil and water conservation measures with nutrient management in semiarid Burkina Faso. *Nutr Cycl Agroecosys* 2004 ; 70 : 261-9.
20. Herblot G. Une expérimentation de travail du sol en sec au Burkina Faso. *Mach Agric Trop* 1984 ; 88 : 18-28.
21. Barro A. Effet du travail du sol en sec à la dent RS8 sur l'amélioration de la production du sorgho au Burkina Faso. In Pirot R, Perret S, Manichon H, Cirad. In : *Le travail du sol dans les systèmes mécanisés*. Actes du colloque 11-12 septembre 1996, Cirad-Sar, Montpellier. 1997.
22. Barro A. *Contribution à l'étude des relations eau-sol-plante-machine*. Mémoire de diplôme d'ingénieur d'agronomie tropicale Option recherche ESAT-2, Montpellier, 1988.

23. Sédogo PM, Barro A, Bonzi M. La dent RS8 de travail de sol en sec, une alternative à la charrue. *Science et Technique* 1998 ; 23 : 44-8.
24. Ducreux A. *Caractérisation mécanique des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche d'Afrique de l'Ouest. Étude d'un prototype d'outil permettant de travailler en période sèche*. Thèse université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), Montpellier, 1984.
25. Ducreux A, Manière G. Comportement physique et mécanique du sol lors de son travail. *Machinisme Agricole* 1980 ; 71 : 37-40.
26. Costet J, Sanglerat G. *Cours pratique de mécanique des sols. Plasticité et calcul de tassement*. Paris : Bordas, 1975.
27. Wedum J, Doumbia Y, Sanogho B, Dicko G, Cissé O. Réhabilitation des terres dégradées. Le zaï, dans le cercle de Djenné (au Mali). In : Reij C, Scoones I, Toulmin C. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. Paris ; Amsterdam ; Wageningen : Karthala ; CTA ; CDCS, 1996.
28. Chopart JL. *Étude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide - mil - sorgho - riz pluvial)*. Thèse de 3^e cycle, Institut national polytechnique de Toulouse, 1980.
29. Zombré NP, Mando A, Ilboudo JB. Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur la restauration des jachères très dégradées au Burkina Faso. In : Floret C, Pontanier R, eds. Vol. I. *La jachère en Afrique tropicale, Rôles, Aménagement, Alternatives*. Montrouge : John Libbey Eurotext, 1999.
30. Ambouta KJM, Moussa BI, Ousmane DS. Réhabilitation de la jachère dégradée par les techniques de paillage et de zaï au Sahel. In : Floret C, Pontanier R, eds. Vol. I. *La jachère en Afrique tropicale, Rôles, Aménagement, Alternatives*. Montrouge : John Libbey Eurotext, 1999.
31. Zougmoré R, Kambou NF, Zida Z. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semi-arid Burkina Faso. *Soil Till Res* 2003 ; 71 : 143-9.
32. Dikey J, Bertelsen M, Robins E, et al. Potentialités des mesures de conservation des eaux et des sols dans le Namentenga Burkina Faso. In : Lowenberg-Deboer J, Boffa JM, Dikey J, Robins E, eds. *La recherche intégrée en production agricole et gestion des ressources naturelles*. West Lafayette (États-Unis) : Purdue University, 1994.