

Article original

## Effets des cordons pierreux et du scarifiage sur les caractéristiques physico-chimiques du sol d'un pâturage de glacis au Burkina Faso

### EFFECTS OF STONE LINES AND SCARIFICATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL OF A PASTURE OF GLACIS IN BURKINA FASO

KIEMA A.<sup>1\*</sup>, NACRO H. B.<sup>2</sup>, NIANOGO A. J.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles; DRREA / Sahel – Dori; Province du Séno, Burkina Faso, BP : 80 ; (226) 70 11 30 38 ; e-mail: andre\_kiema@yahoo.fr

<sup>2</sup>Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural (IDR), 01 B.P. 1091, Burkina Faso; Email: nacroh@ yahoo.fr

<sup>3</sup>Union Mondiale pour la Nature (UICN), 01 BP. 3133 Ouagadougou 01, Burkina Faso ; E-mail : aime.nianogo@iucn.org.

\*Auteur correspondant, Email andre\_kiema@yahoo.fr

#### RESUME

L'efficacité des cordons pierreux et du scarifiage sur l'amélioration des paramètres physico-chimiques du sol a été testée en zone sahélienne du Burkina Faso. Le dispositif expérimental comprend 2 ha de parcelles aménagées par la technique des cordons pierreux anti-érosifs, 2 ha de parcelles aménagées par la technique du scarifiage, deux parcelles de 25 m<sup>2</sup> entièrement protégées de toute action anthropique, et une parcelle témoin de 2 ha sans aménagement. La teneur du sol en limons et en argiles baisse dans le cas des parcelles entièrement protégées et augmente pour les autres types d'aménagement. La technique des cordons pierreux, et celle de la scarification ont entraîné une forte augmentation des teneurs du sol en carbone organique, respectivement de 77% et de 107%. Ces techniques ont également entraîné une augmentation des teneurs en azote total (50% et 59% respectivement pour la technique des cordons pierreux, et celle de la scarification) et en phosphore assimilable (respectivement 6% et 13% pour la technique des cordons pierreux, et celle de la scarification). Par contre, la protection intégrale induit une augmentation de la teneur en sable et donc une réduction de la capacité de stockage de la matière organique du sol: elle s'avère donc être une opération inefficace, et inutilement coûteuse. Parce qu'elles améliorent les paramètres physiques du sol (teneur en limons et argiles), les techniques des cordons pierreux et de la scarification peuvent donc être recommandées pour la récupération des sols des pâturages dégradés en zone sahélienne.

**Mots clés:** aménagements anti-érosifs, carbone, azote, phosphore, Burkina Faso.

#### INTRODUCTION

En zone semi aride de l'Afrique de l'Ouest, les pluies sont caractérisées par leur forte intensité et leur courte durée. Elles arrachent ainsi des particules de sols qu'elles contribuent à transporter et à accumuler, dégradant ainsi de vastes étendues de terres. A ce processus naturel, il faut ajouter le mode d'exploitation des ressources naturelles qui provoque une rupture de l'équilibre des systèmes de culture itinérante, accentuant la réduction ou la perte de la fertilité des agrosystèmes sahéliens (Hoefsloot et al., 1993). Ces auteurs estiment que des milliers d'hectares de sols

#### ABSTRACT

Effectiveness of stone bunds and scarification on the improvement of physical and chemical parameters of the soil was tested in the Sahelian zone of Burkina Faso. The experimental device consists of 2 hectares of plots managed by the technique of anti-erosion bunds, 2 ha of plots managed by the technique of scarification, two plots of 25 m<sup>2</sup> fully protected from human actions and a control plot of 2 ha without management. The content of the soil silt and clay down in the case of fully protected plots and increases for other types of management. The technique of stone bunds and that of scarification led to sharp increase levels of soil organic carbon, respectively, 77% and 107%. These techniques have also resulted in increased levels of total nitrogen (50% and 59% respectively for the technique of stone bunds, and that of scarification) and available phosphorus (6% and 13% for technical bunds, and that of the scarification). By cons, full protection induces an increase in sand content and therefore a reduction in the storage capacity of the soil organic matter: it is therefore be ineffective and unnecessarily expensive. Because they improve the physical parameters of the soil (silt and clay content), the techniques of stone bunds and scarification can be recommended for the recovery of degraded pasture land in the Sahel.

**Keywords:** stone bunds, scarifying, carbon, nitrogen,

deviennent ainsi incultes chaque année, sans que la recherche ait encore trouvé les moyens d'y remédier de façon définitive à cette dynamique régressive. Cette dégradation des sols reste donc une des contraintes majeures de la production agricole, voire de la préservation des ressources naturelles (Lafren et Roose, 1998; Kaihura et al., 1999). En effet, l'érosion a des effets négatifs sur les propriétés physico-chimiques du sol telles que la texture, la structure, la teneur en matière organique.

Du fait de la pression démographique, les producteurs ne peuvent plus pratiquer la jachère de longue durée; au Burkina Faso par exemple, de 1950 à 1990, le rapport jachère sur champs cultivés est passé de 4 à 1,5 (Ouédraogo

2000). Les apports extérieurs (engrais minéraux, fumures organiques) qui permettent de compenser les pertes, sont également limités du fait du coût élevés des engrais minéraux, et de l'insuffisance des engrais organiques. Toutefois, d'autres techniques qui permettent aussi de récupérer les sols dégradés, et d'améliorer les rendements sont utilisés par les producteurs. Parmi celles-ci, on peut citer le scarifiage, ou les cordons pierreux qui sont des obstacles physiques faits de blocs de pierres disposés perpendiculairement à la pente, de façon à réduire le ruissellement, à favoriser l'infiltration de l'eau, et la sédimentation des éléments fins du sol (CIRAD - GRET, 2002). De nombreux travaux ont été consacrés à l'évaluation de l'effet des cordons pierreux sur la réduction du ruissellement, et de l'érosion (Lamarchère et Serpentier, 1991), sur l'amélioration des rendements des cultures (Zougmore et al., 2000), et sur les implications socio-économiques des technologies (Maatman et al., 1998). Toutefois, peu de données existent dans la littérature sur l'effet de ces techniques de récupération des sols sur les paramètres physico-chimiques du sol.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'efficacité des cordons pierreux et du scarifiage sur l'amélioration des paramètres physico-chimiques du sol des glacis gravillonnaires en zone sahéenne du Burkina Faso.

## MATERIEL ET METHODES

### Caractéristiques du site

L'étude a été réalisée au Burkina Faso, à Yakouta situé entre les latitudes 14°3'N et 14°10'N et les longitudes 0°5'W et 0°11'W sur un glacis. Le climat est de type sahéen avec une pluviosité annuelle moyenne inférieure à 400 mm (Guinko, 1984). Les températures subissent de grandes variations ; les plus élevées (43°C) sont enregistrées en saison sèche chaude (mars à mai) et les plus basses (10°C) en saison sèche froide (décembre à février). Les sols sont bruns rouges au niveau des dunes, hydromorphes sur les dépressions, squelettiques sur les affleurements rocheux, les cuirasses fossiles plus ou moins dégradées avec épandage gravillonnaire.

Le terroir de Yakouta relève du secteur phytogéographique nord – sahéen, avec une végétation du type steppes arbustives (Guinko, 1984; Toutain, 1994). Il est constitué d'une zone de culture à 20 % et d'une zone pastorale à 80% constituée essentiellement de glacis (Kiema et Sanon, 2001). Des aménagements de cordons pierreux anti-érosifs sur environ sept hectares ont été mis en place en 1999 sur la zone pastorale. Les cordons sont disposés en lignes successives de 140 à 160 m de long, et espacés de 15 à 20 m en moyenne. Les lignes de cordons ont une hauteur d'environ 15 à 20 cm contre une largeur de 30 à 40 cm à la base. Des travaux de scarifications ont également été effectués (sur 2 ha) ainsi que des mises en défens (sur deux parcelles de 15 x 20 m) depuis 1999.

### Dispositif expérimental et prélèvement du sol

Le dispositif expérimental comprend 2 ha de parcelles aménagées par la technique des cordons pierreux anti-érosifs, 2 ha de parcelles aménagées par la technique du scarifiage, deux parcelles de 15 x 20 m entièrement protégées de la pâture, et une parcelle témoin de 2 ha.

Les échantillons de sol ont été prélevés en 2003 dans l'horizon 0-20 cm du sol, respectivement à 0, 10 et 20 m du cordon pierreux, et dans chaque parcelle. Dans chaque cas, quatre échantillons de sol ont été prélevés entre les touffes d'herbes et loin des troncs d'arbres de façon à réduire au minimum l'influence des racines et des micro-organismes associés (Abbadie et Lensi, 1990). Les échantillons ont

ensuite été séchés à l'ombre puis tamisé à 2 mm.

### Analyses

La texture du sol a été déterminée par fractionnement granulométrique sous eau après destruction de la matière organique Balesdent et al. (1991). Les diverses fractions minérales obtenues sont: 100-200 µm (sables grossiers) ; 50-100 µm (sables fins) ; 20-50 µm (limons grossiers) ; 2-20 µm (limons fins) ; 0-2 µm (argile).

La teneur en carbone a été dosée selon la méthode proposée de Walkley et Black adaptée pour les sols du Burkina Faso par Gnankanbary et al. (1998). L'azote total a été dosé selon la méthode Kjeldahl reprise par Pauwels et al. (1992). Les résultats sont exprimés respectivement en g C/kg sol sec et g N/kg sol sec. Le phosphore a été dosé par spectrophotométrie d'après Bray et Kurtz (1945), et les résultats exprimés en mg P/kg sol sec.

Tous les résultats ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) à un critère de classification afin de tester l'effet des différents types d'aménagement sur les caractéristiques physico-chimiques du sol. Le test de Scheffe (1959) a été utilisé pour identifier les moyennes qui diffèrent significativement au seuil de 5%.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Effet de l'aménagement sur les caractéristiques physiques du sol

Les variations des teneurs en éléments minéraux sont présentées dans le tableau I. On observe une augmentation de la teneur en sables dans les parcelles entièrement protégées (13%) et une baisse pour les deux types d'aménagement: 22% et 36% respectivement pour les cordons pierreux et le scarifiage). A l'opposé, la teneur du sol en éléments fins (limons et argiles) baisse dans le cas des parcelles entièrement protégées (21%) et augmente fortement pour les deux types d'aménagement: 63% pour les parcelles à cordons pierreux, et 118% pour celles à scarifiage. L'analyse de variance montre que le type d'aménagement influence significativement ( $P < 0,05$ ) la granulométrie du sol, en particulier la teneur en sables. Les altérations de la texture du sol dues à l'érosion peuvent être une indication du déclin de la qualité physique des sols (Yoni, 2005). Chaque fois que la teneur du sol en éléments fins augmente, il y a lieu de penser que l'on assiste à une amélioration de la qualité des sols. Parce qu'elles améliorent les paramètres physiques du sol (teneur limons et argiles), la technique des cordons pierreux, et bien mieux celle de la scarification peuvent donc être considérées comme idéales pour la récupération des sols dégradées en zone sahéenne. En améliorant de façon sensible le teneur du sol en limons et surtout en argiles, ces techniques augmentent aussi la capacité du sol à séquestrer le carbone (Silver et al., 2000). A l'opposé, la protection intégrale s'avère une opération inefficace (augmentation de la teneur en sable et donc réduction de la capacité de stockage de la matière organique du sol), et donc inutilement coûteuse à raison des frais élevés de mise en place de la barrière de protection (grillage) ou des contraintes de gardiennage, etc.).

**Tableau I:** Effet de l'aménagement sur la texture du sol

| Type d'aménagement          | Teneurs en éléments minéraux (g/100 g sol sec) |                    |                    |
|-----------------------------|--|--------------------|--------------------|
|                             | Sables   | Limons             | Argiles            |
| Parcelle témoin             | 66,85 <sup>a</sup>                             | 13,65 <sup>a</sup> | 15,65 <sup>a</sup> |
| Parcelle protégée           | 75,35 <sup>a</sup>                             | 12,33 <sup>a</sup> | 12,35 <sup>a</sup> |
| Parcelle à cordons pierreux | 52,05 <sup>b</sup>                             | 22,37 <sup>b</sup> | 25,58 <sup>b</sup> |
| Parcelle scarifiée          | 42,60 <sup>b</sup>                             | 23,48 <sup>b</sup> | 34,15 <sup>c</sup> |

Les valeurs portant la même lettre (par colonne) ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Dans l'espace inter cordon, aucune différence significative de la texture du sol n'a été observée entre les prélèvements effectués à 0, 10 et 20 m du cordon. Ce qui veut donc dire que la pose d'un cordon pierreux améliore de façon homogène sur une distance d'au moins 20 m, les paramètres physiques du sol. De ce point de vue, il est donc plus économique en temps et en matériel, d'opter pour un intervalle de 20 m.

### Effet de l'aménagement sur les caractéristiques chimiques du sol

L'érosion et la texture sont des facteurs qui ont une influence directe sur le niveau du stock de matière organique dans les sols tropicaux. En réduisant l'érosion hydrique, et en améliorant la texture du sol notamment la teneur en éléments fins, les techniques d'aménagement appliquées devraient donc améliorer les caractéristiques chimiques (teneurs en carbone, azote et phosphore) du sol. Effectivement, les résultats présentés dans le tableau II montrent que les techniques d'aménagement appliquées influent différemment sur les teneurs des sols en carbone organique, azote total, phosphore assimilable. Les teneurs en carbone organique et en azote total varient respectivement de 1,65‰ et 0,19‰ dans la parcelle protégée à 4‰ et 0,35‰ dans la parcelle scarifiée. L'analyse de variance indique une différence significative entre la teneur en carbone du sol de la parcelle témoin, et celle des parcelles aménagées en cordons pierreux, d'une part, et des parcelles sous scarifiage d'autre part. Il en est de même pour les teneurs en phosphore qui est un des paramètres particulièrement limitant dans les écosystèmes (Sanchez *et al.*, 1997). La protection intégrale n'a aucun effet significatif sur la teneur du sol en carbone. Dans le même sens, aucun des aménagements effectués n'a influé significativement sur le pH, et sur le rapport C/N.

**Tableau II:** Effet du type d'aménagement sur la teneur du sol en carbone organique (‰), en azote total (‰), en phosphore (mg/kg), sur le pH et le rapport C/N

| Type d'aménagement          | Carbone organique (‰) | Azote total (‰)   | Phosphore (mg/kg)  | pH                | C/N             |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Parcelle témoin             | 1,93 <sup>a</sup>     | 0,22 <sup>a</sup> | 67,45 <sup>a</sup> | 5,74 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup>  |
| Parcelle protégée           | 1,65 <sup>a</sup>     | 0,19 <sup>a</sup> | 59,05 <sup>b</sup> | 5,96 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup>  |
| Parcelle à cordons pierreux | 3,42 <sup>b</sup>     | 0,33 <sup>b</sup> | 71,63 <sup>c</sup> | 5,77 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| Parcelle scarifiée          | 4,0 <sup>b</sup>      | 0,35 <sup>b</sup> | 76,25 <sup>d</sup> | 6,14 <sup>a</sup> | 11 <sup>a</sup> |

Les valeurs portant la même lettre (par colonne) ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

La technique des cordons pierreux, et celle de la scarification ont entraîné une augmentation sensible des teneurs du sol en carbone organique, en azote total et en phosphore assimilable. Les cordons pierreux et la scarification sont des obstacles physiques qui favorisent la sédimentation et le piégeage des éléments fins du sol, et donc un stockage du carbone organique. En effet de nombreux auteurs ont établi pour les sols tropicaux, une corrélation positive entre la teneur en carbone organique du sol et celle des argiles et des limons fins (Feller *et al.*, 1996; Yoni, 2005). Plus les teneurs en argile et en limons fins sont élevées, plus les contenus en carbone et en azote sont élevés. Ce lien est également observé ici: les deux techniques améliorent à la fois la teneur du sol en élément

fins et la teneur en carbone organique. La réduction de l'érosion améliore les paramètres chimiques du sol, en freinant les sorties d'éléments fins du système, et en réduisant les pertes de nutriment. En effet, Zougmore *et al.* (2004) ont montré que la réduction de l'érosion due aux cordons pierreux en zone semi aride du Burkina Faso, entraînait également une réduction des pertes d'azote de 27%, 32% et 82% respectivement en un, deux et trois ans.

La distance qui sépare les cordons pierreux a un effet significatif ( $P < 0,05$ ) sur les caractéristiques chimiques du sol (Tableau III). C'est ce qui expliquerait l'effet de l'espace inter cordons pierreux sur le rendement de biomasses (Barbieri *et al.*, 2000; Zougmore *et al.*, 2000). Aucune différence significative n'est observée entre les prélèvements effectués à 10 et 20 m du cordon pierreux. La pose de cordons pierreux espacés de 20 m, permet donc d'améliorer les paramètres physiques, mais aussi les paramètres chimiques du sol.

**Tableau III:** Effet de la distance au cordon de pierres sur la teneur du sol en carbone organique (‰), en azote total (‰), en phosphore (mg/kg), sur le pH et le rapport C/N.

| Distance | Carbone organique (‰) | Azote total (‰)    | Phosphore (mg/kg) | pH                | C/N              |
|----------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 0 m      | 1,97 <sup>a</sup>     | 0,25 <sup>a</sup>  | 58,7 <sup>a</sup> | 6,04 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup>   |
| 10 m     | 4,04 <sup>b</sup>     | 0,41 <sup>b</sup>  | 76,2 <sup>b</sup> | 5,61 <sup>a</sup> | 10 <sup>ab</sup> |
| 20 m     | 4,25 <sup>b</sup>     | 0,31 <sup>ab</sup> | 80,0 <sup>b</sup> | 5,66 <sup>a</sup> | 14 <sup>b</sup>  |

Les valeurs portant la même lettre (par colonne) ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

## CONCLUSION

L'analyse de la répartition spatiale des particules minérales du sol a montré que la pose de cordons pierreux et le scarifiage ont entraîné une augmentation de la teneur du sol en éléments fins (limons et argiles). Ces deux techniques affectent aussi de façon positive et significative les teneurs en carbone organique, en azote total et en phosphore. Cinq années ont donc suffi pour améliorer de façon significative les paramètres physiques du sol. En ce qui concerne les cordons pierreux, il s'est avéré que l'effet positif induit est observable sur une distance de 20 m. Ceci est particulièrement important quand on sait que la pose des cordons pierreux a un coût physique et économique pour les producteurs. A l'échelle du temps d'observation c'est-à-dire entre 1999 et 2003, la protection intégrale n'a pas eu d'effet positif sur les paramètres physico-chimiques du sol; bien au contraire.

Parce qu'elle améliore les paramètres physiques du sol (teneur limons et argiles), la technique des cordons pierreux, et bien mieux celle de la scarification peuvent donc être considérées comme idéales pour la récupération des sols des pâturages dégradés en zone sahélienne.

## REFERENCES

- Abbadie L, Lensi R. 1990. Carbon and nitrogen mineralization and denitrification in a humid savana of West Africa (Lamto, Côte d'Ivoire). *Acta Oecologica*, **11**: 717-728.
- Balesdent J, Pétraud J-P, Feller C. 1991. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Science du sol*, **29** (2): 95-106.
- Barbieri PA, Sainz Rozas HR, Andrade FH, Echeverria HE.



2000. Row Spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. *Agron. J.*, **92**:283–288.
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, **59**: 39–45.
- CIRAD – GRET. 2002. Mémento de l'agronome ; Ministère des affaires étrangères, France.
- Feller C, Albrecht A, Tessier D. 1996. Agregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soil. Structure and organic matter in agricultural soils. *Advances in soils sciences*: 309-359.
- Gnankambary Z, Sedogo PM, Hien V, Lompo F. 1999. Détermination du facteur de correction de la méthode Walkley-Black pour le dosage du carbone organique dans les sols tropicaux. *Actes des 5<sup>èmes</sup> Journées Annuelles de la Société Ouest-Africaine de Chimie. Niamey/Niger*.
- Guinko S. 1984. Végétation de la Haute – Volta. Thèse de Doctorat es Science Naturelles, Univ. Bordeaux II, 2 vols, 394.
- Hoefsloot H, Van Der Pol F, Roeleveld L. 1993. Jachères améliorées : option pour le développement des systèmes de production en Afrique de l'Ouest. Royal Tropical Institute, Amsterdam : Bulletin 333.
- Kaihura F, Kullaya I, Kilasara M, Aune J, Singh B, Lal R. 1999. Soil quality effects of accelerated erosion and management systems in three eco-regions of Tanzania. *Soil Till. Res.*, **53**: 59–70.
- Kiema A, Sanon AO., 2001. Étude des potentialités agro-sylvo-pastorales d'un terroir test comme base de réflexion pour la gestion des ressources naturelles en région sahélienne du Burkina Faso. *Revue Science et Technique, Série Science Naturelle et Agronomie*, **25** (1) : 117– 131.
- Lafren, JM, Roose E. 1998. Methodologies for assessment of soil degradation due to water erosion. In: Lal R, Blum WH, Valentin C, Stewart BA, editors, *Methods for Assessment of Soil Degradation*. *Advances in Soil Science*. Boca Raton : CRC Press, 31–55.
- Lamachère, JM, Serpantie G. 1991. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Bidi, Burkina Faso. In: Kergreis A, Claude J, editors, *Utilisation Rationnelle de l'eau des Petits Bassins Versants en Zone Aride*, Paris : John Libbey Eurotext, 165-178.
- Maatman A, Sawadogo H, Schweigman C, Ouédraogo A. 1998. Application of zaï and rock bunds in the northwest region of Burkina Faso: study of its impact on household level by using a stochastic linear programming model. *Neth. J. Agric. Sci.* **46**, 123-136.
- Ouédraogo A, 2000. Distribution spatio-temporelle de la matière organique dans un sol ferrugineux tropical sous-jachère : disponibilité des nutriments. Mémoire Ingénieur, IDR/UPB, 83.
- Pauwels JM, Van Ranst E, Verloo M, Mvondo Ze A. 1992. Manuel de laboratoire de pédologie: Méthodes d'analyses de sols et de plantes, Equipement, Gestion de Stocks de verrerie et de produits chimiques. *Publications Agricoles*, **28** : 28- 89.
- Sanchez PA, Shepherd KD, Soule MJ, Place FM, Buresh RJ, Izac A-MN, Mkwunye AU, Kwesiga FR, Ndiritu CG, Woomer P. 1997. Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. In: Buresh RJ, Sanchez PA, Calhoun F, editors, *Replenishing Soil Fertility in Africa*, SSSA Spec. Publ. No. 51; SSSA: Madison, WI, 1–46.
- Scheffe H 1959. *The analysis of variance*. Wiley, New York.
- Silver W, Neff J, McGroddy M, Veldkamp E, Keller M, Cosme R. 2000. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, **3**: 193-209.
- Toutain B. 1994. Les potentialités pastorales du nord du Burkina Faso. In : Gaston A, Lamarque G, editors, "Les pâturages sahéliens de l'Afrique de l'Ouest", Pays Bas : Wageningen, 65 – 77.
- Yoni M, 2005. Contribution à l'étude de la dynamique de la matière organique du sol des jachères à *Andropogon gayanus* de Bondokuy, Ouest du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Univ. Ouagadougou, 139.
- Zougmoré R, Guillobez S, Kambou NF, Son G. 2000. Runoff and sorghum performance as affected by the spacing of stone lines in the semiarid Sahelian zone. *Soil & Tillage Research*, **56**: 175-183.
- Zougmoré R, Mando A, Stroosnijder L, Guillobez S, 2004. Nitrogen flows and balances as affected by water and nutrient management in a sorghum cropping system of semiarid Burkina Faso. *Field Crops Research*, **90**: 235–244.