

Bilans des éléments nutritifs dans les systèmes de production de la zone cotonnière du Mali-Sud

S. Kanté¹, E. M. A. Smaling², H. Van Keulen³, Z. J. L. Sanogo¹

Résumé

L'épuisement des nutriments des sols au Mali-Sud est l'une des principales causes de la baisse des rendements. Des bilans réalisés dans cette zone, peu d'informations existent quant à l'impact des techniques mises en œuvre par différentes catégories d'exploitations sur la fertilité de leur terre. Cette étude a eu pour objectif d'analyser la gestion des éléments nutritifs par les différentes classes d'exploitations situées dans deux villages distincts en termes de système de culture. Les 40 exploitations suivies à M'Peresso et Noyaradougou ont été regroupées en trois classes de gestion de la fertilité des sols. Des bilans partiels (apports de fumure moins exportations des graines et pailles) et complets (flux facilement et difficilement mesurables) ont été calculés par classe d'exploitation et par village. Ces bilans permettent d'apprécier l'impact des techniques sur la fertilité des sols. Contrairement au mil et au sorgho, le coton (culture de rente) a eu des bilans partiels en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) positifs. Les bilans complets de l'exploitation en N et K ont été négatifs. Le déficit est plus accentué pour le système coton-mil/sorgho que celui du coton-maïs. Sans une amélioration de la gestion actuelle, il ne restera que 48 à 56 % du stock de N du sol dans 20 ans.

Mots clés : bilans NPK, classes d'exploitations, Mali-Sud, coton/céréales/élevage, gestion.

Nutrient balance in farming systems in the cotton area of Southern Mali

Abstract

Depletion of nutrient in Southern Mali is one of the most important reason of decrease yield. From nutrient balance in this area, there is very few information about impact of technologies used by different categories of farmers in management of their soil fertility. This study has had for objectives to analyse nutrient

¹ Equipe des systèmes de production et Gestion des ressources naturelles (ESPGRN), Institut d'économie rurale (IER), BP 186 Sikasso, Mali.

² Group soil inventarisation and Land evaluation, Environmental sciences expertise group, Wageningen University and Research centre, Wageningen, the Netherlands.

³ Group plant production systems/Plant research international, Plant sciences expertise group, Wageningen University and Research centre, Wageningen, the Netherlands.

management by different categories of farmers living on two distinct villages in term of production system. The 40 household followed in M'Peresso and Noyaradougou had been regrouped in 3 different categories according to their management of soil fertility. The « partial » (input of nutrients minus nutrients withdrawn in crop and residues) and « complete » (easily and hardly measurable components of nutrient balance) farm nutrient balances were calculated per class of household and per village. These balance allow to appreciate impact of technologies on soil fertility. In opposite of millet and sorghum, cotton (cash crop), had positive « partial nutrient balances » in nitrogen, phosphorus and potassium. The « complete » farm balance is negative for nitrogen and potassium and deficit is higher in the system based on cotton-millet/sorghum than on cotton-maize. Within 20 years and without improvement of current management, there will have about 48 to 56 % of nitrogen stock of soil .

Keywords: NPK balance, classes of household, southern Mali, cotton/cereal/cattle braiding, management.

Introduction

Le problème de stagnation, voire de baisse des rendements devient de plus en plus préoccupant dans les zones pionnières de la production cotonnière du Mali-Sud. La protection de la capacité productive des sols est déterminée dans une large mesure par les bilans des éléments nutritifs. La conclusion générale qu'on peut tirer de la plupart des études faites sur les bilans d'éléments nutritifs au Mali-Sud est que les paysans de cette zone ont longtemps produit et produisent encore au détriment du capital sol. (VAN DER POL, 1992 ; SMALING, 1993a ; CAMARA, 1996 ; CRETENET, 1996). En fonction du système de culture, le bilan en N varie entre - 27 et - 34, entre 0 et 1 pour P et entre - 18 et - 28 kg/ha pour K (VAN DER POL, 1993). Cependant, à Lanfiala (Mali-Sud/Kadiolo), le bilan pour le phosphore et le potassium est positif, tandis que celui de l'azote est de - 3,2 ; - 4,7 ; - 21,4 et de + 2 3,3 kg/ha respectivement pour le centre du village, des hameaux, la périphérie du village et le campement peul (RAMISCH, 1999). Cette grande variabilité des bilans au Mali-Sud, au sein d'un village ou même entre les cultures d'une exploitation doit, comme évoqué par VAN DEN BOSCH *et al.* (1998), SCOONES et TOULMIN (1998) et RAMISCH (1999), pousser à les traiter avec prudence et d'un œil critique afin d'éviter des généralisations abusives sur l'ampleur des pertes. Ces bilans sont des indicateurs précieux d'ordre général qui ne donnent cependant pas l'impact des techniques mises en œuvre par différentes catégories d'exploitations sur la fertilité de leur terre.

Cette étude a pour objectif d'analyser la gestion des flux d'éléments nutritifs par les différentes classes d'exploitations situées dans les localités distinctes en terme de pression sur les terres et de système de culture en zones de la Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles (CMDT).

Matériel et méthodes

Sites d'étude

L'étude s'est déroulée dans les villages de M'Peresso (région CMDT de Koutiala) et de Noyaradougou (région CMDT de Sikasso). Le potentiel agro-démographique des terres (PAT) varie selon les régions CMDT. Selon SCHRADER et WENNIK (1996), le nombre d'hectares cultivables encore en réserve pour chaque hectare cultivé est de 1,47 pour la région CMDT de Koutiala et de 3,65 pour celle de Sikasso. A M'Peresso 44 % des terres exploitées sont sableuses contre 13 % à Noyaradougou (KANTE 2001).

Echantillon et matériel végétal

De 1994 à 1997, 40 exploitations ont été suivies, soit 20 par village. Les données (nombre de sacs d'engrais, de charretées de fumure organique, fourrage, litière et compost) ont été collectées en utilisant une approche participative de recherche-action basée sur l'utilisation d'outils visuels comme la carte d'exploitation avec les différents flux (apports et exportations). Les 40 exploitations suivies ont, en fonction de leur stratégie de gestion de la fertilité des sols, été regroupées par les paysans en classe I (gestion bonne), classe II (gestion moyenne), classe III (gestion faible).

Le matériel végétal était constitué de toutes les cultures de l'exploitation agricole. En plus des principales cultures (coton, maïs, sorgho, mil), l'arachide, la dolique, le niébé, la patate et le voandzou rencontrés dans les exploitations ont été pris en compte dans le calcul des bilans de l'exploitation.

Méthode de calcul des bilans

Les données utilisées dans le bilan sont de deux types :

- données primaires obtenues à partir des mesures au champ et des interviews des paysans et,
- données estimées qui sont des combinaisons des mesures au champ, de données sur les sites et les fonctions de transfert, autrement dit, des coefficients issus des études précédentes (VAN DEN BOSCH *et al.*, 1998).

Les données des 40 exploitations suivies et celles relatives aux superficies équivalentes des cultures associées, au rapport tige-graine des cultures et au taux de N dans le sol ont été considérées dans le calcul du bilan. D'autres coefficients issus de la bibliographie ont ensuite été utilisés pour convertir les quantités mesurées de fumure, de graines et de résidus en NPK. Les bilans ont été calculés par culture, par exploitation, par classe d'exploitation et par village. Dans le calcul des bilans, les jachères n'ont pas été prises en compte.

Bilans partiels de N, P et K de l'exploitation

Dans le calcul des bilans partiels, l'accent est mis sur les flux d'éléments nutritifs facilement mesurables. Il s'agit des apports d'éléments nutritifs à travers les fumures minérales (IN1) et organiques (IN2) et des exportations à travers les graines (OUT1) et résidus (OUT2)

(SMALING *et al.*, 1996). Dans le calcul, pour mieux cerner les flux, nous avons subdivisé les apports de fumures organiques en celles apportées par l'élevage (IN2e : fumier, poudrette des parcs et du parcage direct dans le champ, les excréments de petits ruminants et crottins d'ânes, fientes) et en celles apportées par le ménage (IN2m : ordures, composts). Les exportations de résidus ont de même été subdivisées en ceux exportés par l'élevage (OUT2e : fourrage, litière, vaine pâture), par le ménage (OUT2m : intrant des compostières, des tas d'ordure, du sel de potasse) et par les brûlis (OUT2b). Les quantités de résidus laissés sur place, piétinés par les animaux, en partie dégradés par les termites et enfouis au moment du labour ont été considérées comme des éléments neutres du bilan (ni perte, ni apport, mais juste un recyclage interne). Dans le calcul des bilans, il a été considéré que l'azote des résidus brûlés est totalement perdu et que 10 % du phosphore et du potassium sont perdus par la même occasion (QUAK cité par CAMARA, 1996).

Bilans complets de N, P et K de l'exploitation

En plus des variables du bilan partiel (IN1, IN2, OUT1 et OUT2), les dépôts atmosphériques (IN3), la fixation biologique de l'azote (IN4), les pertes par lessivage (OUT3), les pertes gazeuses (OUT4) et par érosion (OUT5) ont été considérées. Pour le calcul des flux difficiles (IN3, IN4 et OUT5), les informations et régressions de STOORVOGEL et SMALING (1990a et 1990b) ont été utilisées. Pour les pertes comme OUT3 et OUT4, les formules utilisées par NDOUMBE et VAN DER POL (1999) ont été utilisées.

Dépôts atmosphériques (IN3)

Les apports par les pluies et poussières considérés (STOORVOGEL et SMALING, 1990a et 1990b) dans les calculs étaient (en kg/ha) : 5,4 pour N ; 2,09 pour P et 3,4 pour K.

Fixation biologique de N (IN4)

Dans les calculs, il a été considéré que les légumineuses peuvent par symbiose satisfaire 60 % de leur besoin en azote et que toutes les cultures bénéficient de l'azote fixé par voie non-symbiotique. En fonction des LWC (Land/Water Class), les valeurs 4 et 5 kg/ha/an d'azote non-symbiotique ont été considérées respectivement à M'Peresso et Noyaradougou (STOORVOGEL et SMALING, 1990a et b cités par KANTE, 2001).

Pertes par lessivage (OUT3)

Le lessivage selon le Larousse Agricole est l'entraînement par l'eau en profondeur des sels solubles et des colloïdes du sol. Les pertes par lessivage considérées ici concernent N et K. Ces pertes dépendent de la perméabilité du sol (texture et structure), de l'importance des engrais azotés et potassiques utilisés, du pouvoir de rétention de certains éléments par le sol, de la plante, de la pluviométrie et de sa distribution (IER/CMDT, 1987). Dans le calcul des pertes par lessivage, il a été considéré que 8 % de l'azote et 12 % du potassium des fumures totales appliquées sont perdus par lessivage (KANTE, 2001).

Cas de l'azote

Selon NDOUMBE et VAN DER POL (1999), les pertes d'azote par lessivage sont calculées comme suit :

$$\text{OUT3} = \text{OUT3mo} + \text{OUT3f} = \text{PI} * \text{OUT3s} + 0,01 * \text{Pfix} * \text{PI} * \text{IN}(1+2)_{ix}$$

où,

- OUT3mo : perte fixe (perte de base à partir de la matière organique du sol) par lessivage d'éléments nutritifs d'une localité kg/ha/an
- OUT3f : perte par lessivage d'éléments nutritifs à partir des apports kg/ha/an (pour une saison de culture)
- PI : coefficient de correction relatif à la localité
- OUT3s : perte standard de lessivage par type de sol en kg/ha/an
- Pfix : pourcentage d'éléments nutritifs appliqué perdu par lessivage pour chaque culture/type de sol (%)
- IN(1+2)_{ix} : élément nutritif appliqué kg/ha (où i : apport, x : élément nutritif)

Selon KANTE (2001), PI est égale à 0,9 à M'Peresso et 1 à Noyaradougou, tandis que OUT3s est égale à 8 et 12 kg/ha/an dans les localités respectives.

Cas du potassium

Pour le potassium, les mêmes formules ont été utilisées. Seulement, dans le calcul de PI, une régression entre l'azote et le potassium a été introduite comme suite : $\text{PIK} = 0,3015 * \text{PIN}$. En effet, en mettant dans une régression les pertes de N et de K par culture selon NDOUMBE et VAN DER POL (1999), on obtient une telle relation avec $R^2 = 0,97$.

Pertes gazeuses (OUT4)

Il s'agit des pertes d'azote par volatilisation et dénitrification. Les pertes gazeuses à partir des fumures varient de 17-36 % et celles de l'azote de la matière organique du sol entre 15-25 kg/ha (PIERI, 1986 et GIGOU, 1986, cités par NDOUMBE et VAN DER POL, 1999).

$$\text{OUT4} = \text{OUT4b} + \text{OUT4f}$$

où,

- OUT4b : perte gazeuse fixe (ou de base) pour chaque culture (kg/ha/an)
- OUT4f : perte gazeuse de chaque fumure (kg/ha/an)

Pour le calcul de OUT4, les valeurs des pertes d'azote utilisées par Van der Pol au Mali-Sud ont été considérées. Il s'agit de 25 % des pertes à partir des engrais et 12 kg/ha/an comme perte de base (NDOUMBE et VAN DER POL, 1999).

Erosion (OUT5)

Les pertes par érosion et ruissellement sont fonction de l'agressivité et de l'intensité des pluies, de la pente, de la perméabilité du sol et de sa richesse en éléments minéraux. Les régressions de STOOORVOGEL et SMALING (1990a) ont été utilisées pour calculer ces pertes :

$$\text{OUT 5 (N)} = \text{EF} * \text{Nc} * \text{Pe}$$

$$\text{OUT 5 (P)} = \text{EF} * \text{Pc} * \text{Pe}$$

$$\text{OUT 5 (K)} = \text{EF} * \text{Kc} * \text{Pe}$$

où,

- EF : Facteur d'enrichissement
- Nc : Concentration de N (%) dans le sol érodé selon la classe de fertilité de la FAO
- Pc : Concentration de P (%) dans le sol érodé selon la classe de fertilité de la FAO
- Kc : Concentration de K (%) dans le sol érodé selon la classe de fertilité de la FAO
- Pe : Perte de sol par érosion (tonne/ha/an) selon les Systèmes d'Utilisation des Terres (LUS : Land Use Systems) de la FAO

Les valeurs de Nc, Pc et Kc considérées pour les calculs sont respectivement égales à 0,1 ; 0,022 ; 0,08 kg/ha. Le facteur d'enrichissement (EF) a été considéré comme étant égal à 2 pour N, P et K (STOOORVOGEL et SMALING, 1990a). De la synthèse des travaux effectués au Mali-Sud, il ressort que la perte moyenne par érosion dans la zone cultivée oscille autour de 7,41 t/ha/an (KANTE, 2001). Pour les calculs, la valeur de 7 t/ha/an a été considérée.

Résultats

Les bilans d'éléments nutritifs sont assez influencés par les systèmes de production en cours dans les villages d'étude. Certaines pratiques de gestion des éléments nutritifs sont étroitement liées aux capacités d'intervention de différentes classes exploitations.

Système de production et caractéristiques des classes

Le système de production de la zone est basé sur le coton, les céréales et l'élevage. Le coton constitue le moteur du système et reçoit l'essentiel des fumures. Le système de culture était basé sur la rotation coton-céréale. Le coton occupait 36 % des superficies cultivées à M'Peresso et 46 % à Noyaradougou. La rotation dominante était du type coton-sorgho/mil (84 % de l'assolement) à M'Peresso et coton-maïs (76 % de l'assolement) à Noyaradougou (Figure 1).

Les classes I et II sont plus fournies en main d'œuvre que la classe III (tableau I). La classe I a environ 3 fois plus d'animaux (UBT) que la classe III et environ 1,5 à 2 fois plus que la classe II. Cette tendance entre les classes est observée tant sur le plan des superficies cultivées que sur celui de la fumure d'origine animale produite et utilisée.

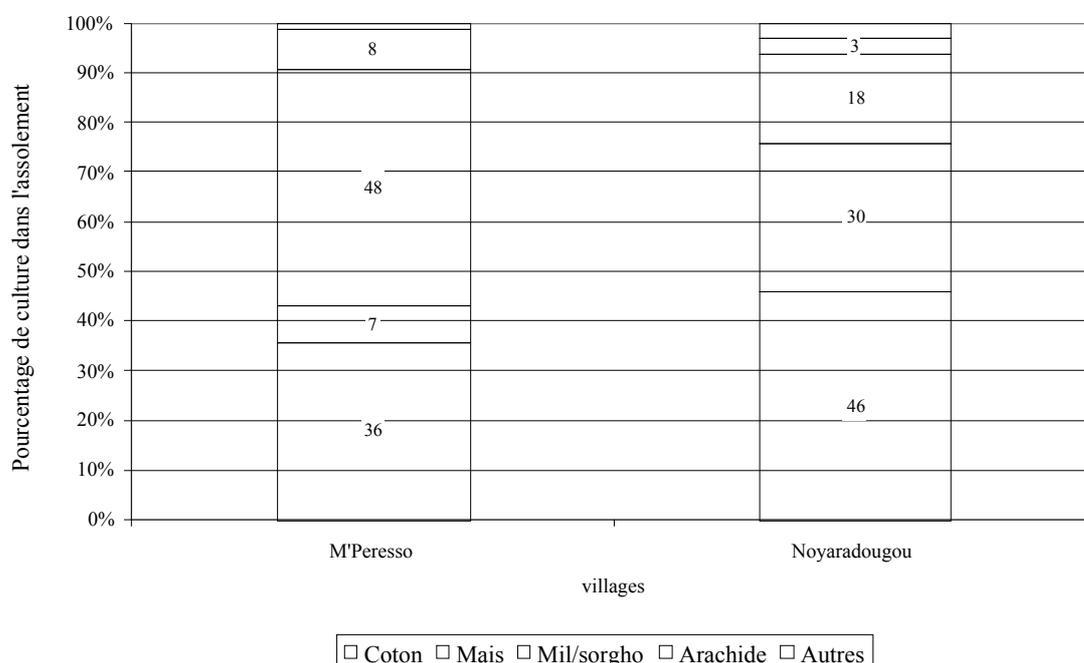


Figure 1. Pourcentage de culture dans l'assolement à M'Peresso et Noyaradougou.

Tableau I. Caractéristiques structurelles et de gestion des classes.

Paramètres	M'Peresso			Noyaradougou		
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe I	Classe II	Classe III
Total actifs (#)	13,0	7,0	4,0	10,0	11,0	5,0
Actifs hommes (#)	7,0	4,0	3,0	4,0	5,0	2,0
Total bovins (#)	27,0	13,0	5,0	13,0	8,0	3,0
UBT total (#)	29,0	12,0	8,0	11,0	7,0	4,0
Superficie cultivée (ha)	19,8	12,3	8,4	12,8	9,4	6,4
Superficie coton (ha)	7,5	4,3	2,8	6,0	4,0	2,8
Superficie maïs (ha)	1,5	0,9	0,5	3,8	2,7	2,0
Superficie céréales (ha)	10,4	6,8	4,8	6,2	5,0	3,2
Superficie légumineuses (ha)	1,9	1,2	0,8	0,6	0,6	0,6
Fumure animale (t)	20,7	10,2	5,7	6,7	2,7	2,5
Fumure organique totale (t)	59,0	24,0	14,0	14,0	7,0	9,0

(#) Il s'agit là du nombre moyen de la classe de 1994 à 1997; UBT: Unité de Bétail Tropical avec un poids standard de 250 kg. La superficie du maïs est incluse dans celle des céréales.

Bilans partiels

Bilans partiels du coton

A M'Peresso, les exportations à partir des résidus de coton sont faibles et varient entre 5 et 7 kg/ha de N, 0,2 et 0,3 kg/ha de P et entre 4 et 6 kg/ha de K en comparaison avec des apports de matière organique variant entre 47 et 68 kg/ha de N, 9 et 13 kg/ha de P et 63 et 93 kg/ha de K (tableau II).

A Noyaradougou, les exportations à partir des résidus de coton sont faibles et varient entre 14 et 15 kg/ha de N, 0,4 et 0,7 kg/ha de P et entre 7 et 12 kg/ha de K en comparaison avec des apports de matière organique variant entre 21 et 22 kg/ha de N, 3,2 et 4,1 kg/ha de P et 24 et 29 kg/ha de K (tableau II).

Bilans partiels de N, P et K de l'exploitation agricole

Des bilans présentés au tableau III, celui de l'azote est positif à Noyaradougou. Il oscille entre 0,7 et - 2,5 kg/ha/an à M'Peresso. Indépendamment du village et de la classe, le bilan du phosphore est positif et varie entre 2,9 et 6,5 kg/ha/an. Le bilan partiel du potassium est déficitaire dans toutes les classes exceptée la classe III de Noyaradougou.

Bilans complets de N, P et K de l'exploitation

Les bilans complets de l'azote et du potassium sont négatifs, indépendamment du village et de la classe (tableau IV). Celui du phosphore est positif dans tous les cas.

Discussion

Bilans partiels

Bilans partiels du coton

Indépendamment du village et de la classe, le coton qui est le moteur du système coton/céréales/élevage a un bilan partiel NPK positif (tableau II). Selon KANTE (2001), le coton reçoit 93 % des fumures organiques utilisées à M'Peresso et 89 % à Noyaradougou. Durant les campagnes agricoles 2000-2002, 94 à 100 % des producteurs de coton des zones de Koutiala et Sikasso ont utilisé l'urée et les engrais complexes sur le coton (CMDT, 2001 et CMDT 2002). Les cultures de rente grâce aux importantes quantités appliquées de fumure ont un bilan moins négatif que les cultures de subsistance (ELIAS *et al.*, 1998 ; VAN DEN BOSCH *et al.*, 1998 ; SCOONES et TOULMIN, 1999, cités par HILHORST *et al.*, 2000). Une pareille tendance a également été observée par DUGUE (1999), selon lequel les bilans apparents (partiels) en P et K du coton sont positifs à Heri et Oroulabo. La valeur de N et K est au moins 2 fois plus élevée

Tableau II. Bilans partiels de N, P et K (kg/ha/an) du coton dans les villages de M'Peresso et de Noyaradougou en zone Mali-Sud (moyenne de 3 ans pour M'Peresso et de 4 ans pour Noyaradougou)

Éléments des bilans partiels	M'Peresso															Noyaradougou														
	Classe I					Classe II					Classe III					Classe I					Classe II					Classe III				
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Fumure minérale	IN1	36	10	11	44	13	13	37	9	10	50	14	15	57	13	14	51	14	15	15										
Fumure organique	IN2	68	13	93	47	9	63	48	9	65	22	4	29	18	3	24	21	4	28	28										
FO des animaux	In2e	35	6	49	26	4,3	35,6	24,9	4	35	12,7	2,1	17,7	9,4	1,5	13,2	8	1,4	11	11										
FO du ménage	In2m	33	7	44	20	4,6	27,5	21,7	4,9	29	8,6	1,7	11,6	7,8	1,5	10,6	12,5	2,5	17	17										
FO volaille	In2a	0	0	0	1	0,3	0,3	1,3	0,5	0,5	0,4	0,1	0,1	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2										
Apport total	IN1 + IN2	104	23	104	91	22	76	85	18	75	72	18	44	75	16	38	72	18	43	43										
Graines et fibres	OUT1	30	4	8	24	3	7	22	3	6	35	4	10	36	4	10	30	4	8	8										
Résidus	OUT2	7	0,3	6	6	0,2	5	5	0,2	4	15	1	12	15	1	11	14	0	7	7										
R des animaux	Out2e	6	0,3	5,4	4,5	0,2	4	3,9	0,2	3,5	8,9	0,5	7,9	5,3	0,3	4,7	6,2	0,2	3,3	3,3										
R du ménage	Out2m	0,9	0	0,8	0,8	0	0,7	1,0	0	0,9	4	0,2	3,5	6,5	0,3	5,8	3,4	0,2	3,0	3,0										
R brûlé	Out2b	0,3	0	0	0,4	0	0	0,4	0	0	1,5	0	0,1	3,2	0	0,3	4,6	0	0,4	0,4										
Exportation totale	OUT1 + OUT2	37	4,3	14	30	3	12	27	3	10	50	5	21	51	5	21	44	4	15	15										
Bilan	IN-OUT	68	19	90	61	19	64	58	15	64	22	13	22	24	11	17	28	14	28	28										

FO = Fumure Organique

R = Résidus de récolte

FO des animaux : fumier + crottins + poudrette de pare et du parage direct, FO du ménage : ordure + compost

R des animaux : résidus utilisés comme fourrage, litière et en vaine pâture

R du ménage : résidus utilisés pour alimenter les tas d'ordures, les compostières et le "sel de potasse pour le tô"

NB : Les résidus laissés sur place et partiellement dégradés par les termites ont été considérés comme les éléments neutres du bilan

Tableau III. Bilans partiels de N, P et K (kg/ha/an) de l'exploitation dans les villages de M¹Peresso et de Noyaradougou en zone Mali-Sud (moyenne de 3 ans).

Éléments des bilans partiels	M ¹ Peresso															Noyaradougou								
	Classe I			Classe II			Classe III			Classe I			Classe II			Classe III								
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K						
Fumure minérale IN1	15,9	4,1	4,4	16,4	4,6	4,9	13,4	3,2	3,4	42,9	9,1	11,3	42,1	7,6	9,7	40,6	8	9,9						
Fumure organique IN2	23,8	4,6	32,7	16,4	3,2	22	14,5	2,9	19,4	11,5	2,1	15,7	8,1	1,5	11	11,8	2,2	15,9						
FO des animaux In2e	12,0	1,9	16,8	9,7	1,7	13	8	1,4	10,6	6,9	1,2	9,5	4,5	0,8	6	4,8	0,9	6,4						
FO du ménage In2m	11,8	2,7	15,9	6,7	1,5	9	6,5	1,5	8,8	4,5	0,9	6,2	3,6	0,7	5	7,0	1,3	9,5						
Apport total	39,8	8,7	37,1	32,8	7,8	26,9	27,9	6,0	22,8	54,5	11,2	27	50,2	9,1	20,7	52,4	10,2	25,8						
Graines et fibres OUT1	21,6	2,5	5,4	18,8	2,2	4,8	17,3	2,0	4,2	28,2	3,7	7,3	24	3,1	5,8	22,6	2,9	5,4						
Résidus OUT2	19,4	1,6	50,3	13,3	1,1	33,3	13,1	1,1	35,7	17,3	1,3	23,8	15	1,1	22,6	17,3	0,8	17						
R des animaux Out2e	14,9	1,3	36,9	12	1,0	31,2	10,9	0,9	31,3	11,7	1,0	18,1	7,8	0,7	14,6	6,2	0,6	13,1						
R du ménage Out2m	4,1	0,3	13,3	0,7	0,06	1,9	1,9	0,2	4,3	3,4	0,25	5,2	5	0,4	7,7	1,9	0,14	2,3						
R brûlé Out2b	0,4	0,03	0,09	0,6	0,06	0,1	0,25	0,02	0,06	2,3	0,02	0,5	2,2	0,02	0,3	9,2	0,09	1,6						
Exportation totale	40,9	4,1	55,7	32,1	3,3	38,1	30,4	3,1	40	45,5	5	31,1	39	4,2	28,4	39,9	3,7	22,4						
Bilan	-0,3	4,7	-18,6	0,7	4,5	-11,2	-2,5	2,9	-17,2	9	6,2	-4,1	11,2	4,9	-7,7	12,5	6,5	3,4						
R Incorporés	11,7	0,9	35	16,8	1,4	47,6	15,3	1,2	47,2	8,8	1	16,5	10	1,0	22,8	8,2	0,7	18						

FO = Fumure Organique

R = Résidus de récolte

FO des animaux : fumier + crottins + poudrette de parc et du parcage direct, FO du ménage : ordure + compost,

R des animaux : résidus utilisés comme fourrage, litière et en vaine pâture,

R du ménage : résidus utilisés pour alimenter les tas d'ordures, les compostières et le « sel de potasse pour le tô »,

R incorporés : résidus laissés sur place, piétinés par les animaux, en partie dégradés par les termites et enfouis au moment du labour. Cette partie a été considérée comme élément neutre du bilan.

Tableau IV. Bilans complets de N, P et K (kg/ha/an) de l'exploitation dans les villages de M'Peresso et de Noyaradougou en zone Mali-Sud (moyenne de 3 ans).

Éléments des bilans partiels	M'Peresso									Noyaradougou								
	Classe I			Classe II			Classe III			Classe I			Classe II			Classe III		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Fumure minérale	15,9	4,1	4,4	16,4	4,6	4,9	13,4	3,2	3,4	42,9	9,1	11,3	42,1	7,6	9,7	40,6	8	9,9
Fumure organique	23,8	4,6	32,7	16,4	3,2	2,2	14,5	2,9	19,4	11,5	2,1	15,7	8,1	1,5	11	11,8	2,2	15,9
Apport atmosphérique	5,4	2,1	3,4	5,4	2,1	3,4	5,4	2,1	3,4	5,4	2,1	3,4	5,4	2,1	3,4	5,4	2,1	3,4
Apport biologique	5,8	-	-	5,5	-	-	5,9	-	-	5,3	-	-	5,1	-	-	5,4	-	-
Apport total	51,0	10,8	40,5	43,7	9,8	30,3	39,2	8,2	26,2	65,2	13,3	30,4	60,7	11,2	24,1	63,2	12,3	29,2
Graines et fibres	21,6	2,5	5,4	18,8	2,2	4,8	17,3	2,0	4,2	28,2	3,7	7,3	24	3,1	5,8	22,6	2,9	5,4
Résidus	19,4	1,6	50,3	13,3	1,1	33,3	13,1	1,1	35,7	17,3	1,3	23,8	15	1,1	22,6	17,3	0,8	17
Perte par lessivage	9,9	-	6,1	9,3	-	5	9	-	4,6	16,3	-	6,9	16	-	6,1	16,2	-	6,7
Perte gazeuse	16,9	-	-	15,2	-	-	14	-	-	25,6	-	-	24,6	-	-	24,1	-	-
Perte par érosion	14	2,8	11,2	14	2,8	11,2	14	2,8	11,2	14	2,8	11,2	14	2,8	11,2	14	2,8	11,2
Exportation totale	81,8	7	73	70,6	6	54,3	67,4	5,9	55,7	101,5	7,8	49,2	93,6	7	45,7	95,2	6,5	40,3
Bilan	-30,8	3,8	-32,5	-26,9	3,8-24	-28,2	2,3	-29,5	-36,3	5,5	-18,8	-32,9	4,2	-21,6	-32	5,8	-11,1	-11,1
R Incorporés	11,7	0,9	35	16,8	1,4	47,6	15,3	1,2	47,2	8,8	1	16,5	10	1,0	22,8	8,2	0,7	18

R = Résidus de récolte

R incorporés : résidus laissés sur place, piétinés par les animaux, en partie dégradés par les termites et enfouis au moment du labour. Cette partie a été considérée comme élément neutre du bilan

à M'Peresso qu'à Noyaradougou. Cette différence est due au fait que M'Peresso utilise plus de fumure et produit moins de coton (rendements) que Noyaradougou. A M'Peresso où la pression sur les terres est forte, plus de 50 % des apports d'éléments nutritifs sont d'origine organique avec environ 50 % d'ordures ménagères (KANTE, 2001). Les sources organiques d'éléments nutritifs ont un taux de recouvrement plus bas que les sources inorganiques et par conséquent, les bilans sont plus favorables pour les premiers. Les fortes doses de fumure organique mal décomposées et associées à de faibles doses d'engrais minéraux peuvent provoquer une immobilisation de l'azote sous cotonnier en début de cycle à M'Peresso, créant du coup des problèmes de synchronisation (SEDOGO, 1993 ; TANNER et MUGWIRA, 1984 cités par MURWIRA *et al.*, 1993).

A M'Peresso, la classe I a un bilan positif en potassium supérieur à celui des autres classes, tandis qu'à Noyaradougou, la classe III domine légèrement les autres en termes de bilan. En effet, les exploitations de la classe I de M'Peresso utilisent plus de fumure organique par unité de surface que les classes II et III. La classe III de Noyaradougou utilise pratiquement les mêmes quantités de fumure que les deux autres classes, mais exporte moins que celles-ci. Les quantités importantes de fumures utilisées sur coton sont également accompagnées de mesures de lutte anti-érosive afin de réduire les pertes d'éléments nutritifs.

Bilans partiels de N, P et K de l'exploitation agricole

En termes de bilans de l'exploitation, aucune tendance nette ne se dessine entre les classes. Cependant, à Noyaradougou, le bilan de l'azote croît de la classe I vers la classe III. En effet, le rapport IN/OUT (apport/exportation) croît dans le même sens et indique une meilleure valorisation de l'azote dans la classe I. La classe I est mieux équipée et mieux fournie en main d'œuvre (tableau I).

Les bilans partiels de N et K sont plus déficitaires à M'Peresso qu'à Noyaradougou. A Noyaradougou le système de culture est basé sur le coton-maïs (76 % des superficies cultivées) qui sont fertilisés, tandis qu'à M'Peresso, ces cultures occupent 42 % des superficies contre 48 % pour le mil et le sorgho (figure 1). Le petit mil et le sorgho qui dominent à M'Peresso sont généralement très peu ou pas fertilisés et sont de gros exportateurs d'azote et surtout de potassium. Durant les campagnes agricoles 2000-2002, seules 1 à 14 % des parcelles de mil et de sorgho ont reçu les engrais minéraux dans les zones de Koutiala et Sikasso (CMDT, 2001 et CMDT, 2002). Pendant la même période, 62 à 82 % des parcelles de maïs ont reçu l'urée et 48 à 82 % ont reçu les engrais complexes (CMDT, 2001 et CMDT, 2002). Noyaradougou utilise 2,5 à 3 fois plus de fumure minérale que M'Peresso, soit 25 à 27 kg/ha d'azote de plus. Cependant, M'Peresso avec son cheptel important, utilise 1,2 à 2 fois plus de fumure organique que Noyaradougou soit 2,7 à 12,3 kg/ha d'azote de plus. Ainsi, les paysans de M'Peresso font une substitution partielle des fumures minérales par les fumures organiques. Une telle stratégie de compensation des engrais chimiques par la fumure organique est observée chez tous les types d'exploitations agricoles et surtout les mieux équipés (DJOUARA *et al.*, 2004). Le rapport IN1/IN2 (fumure minérale/fumure organique) de l'azote, varie entre 0,7 et 1 à M'Peresso, tandis qu'il oscille entre 3,4 et 3,7 à Noyaradougou. De tels rapports ne sont pas sans effet sur

les caractéristiques du sol. Avec plus d'engrais azotés et moins de fumure, on tend vers une acidification des sols et son corollaire de baisse de rendement. Avec plus de fumure organique de qualité médiocre, on tend vers une immobilisation de l'azote. Alors, la question est de savoir où se trouve l'équilibre entre les deux ? Le rapport potassium exporté par les animaux et fumure organique apportée par eux (Out_{2e}/In_{2e} , tableau III) oscille indépendamment du village entre 2 et 3, autrement dit, les animaux exportent 2 à 3 fois plus de potassium qu'ils n'apportent au système. Cela demande une meilleure conduite des animaux (pâturage restreint, stabulation permanente en saison sèche) afin de réduire les pertes d'éléments nutritifs. En revanche, le recyclage des résidus à travers le ménage doit être encouragé, car là, les apports sont supérieurs aux exportations. En effet, les résidus ne sont pas les seuls intrants des ordures et des composts.

Bilans complets de N, P et K de l'exploitation

Contrairement au bilan partiel, le bilan complet de l'azote à M'Peresso est meilleur à celui de Noyaradougou. Ceci est surtout dû à la forte mobilité de l'azote dont une certaine portion est perdue par lixiviation et voie gazeuse tant au niveau du sol que des fumures utilisées. Les pertes par lixiviation augmentent avec le niveau de la fertilisation. Or les exploitations de Noyaradougou utilisent plus d'azote que celles de M'Peresso (tableaux III et IV). La lixiviation est aussi influencée par la fertilité du sol et la pluviométrie. Les sols cultivés de Noyaradougou avec 0,03 % d'azote sont relativement plus fertiles que ceux de M'Peresso qui contiennent à peine 0,02 % (KANTE, 2001). La pluviométrie est plus élevée à Noyaradougou (1000 mm) qu'à M'Peresso (800 mm). Or, selon VAN DER POL et AUTISSIER (1997), il existe une bonne corrélation entre les bilans et la pluviométrie qui détermine dans une grande mesure les processus d'érosion, de lixiviation et aussi d'exportation par les cultures ($N = -0,031 * \text{mm annuel}$, $r^2 = 0,88$). Selon WALAGA *et al.* (2000), les pertes d'azote par lixiviation sont supérieures à 100 kg/ha sur les terres fertiles du district de Kabarole, alors que les apports de cet élément ne dépassent pas 35 kg/ha. Ainsi, à cause des facteurs cités ci-dessus, les pertes de l'azote minéralisé du sol et de celui des fumures appliquées est plus élevée à Noyaradougou qu'à M'Peresso. La différence entre le bilan partiel et complet oscille entre 26 et 30 kg/ha d'azote à M'Peresso et entre 43 et 46 kg/ha à Noyaradougou. Cependant, la différence entre les deux villages pourrait être moins importante si la texture des sols avait été prise en compte. En effet, les sols sont plus sableux à M'Peresso qu'à Noyaradougou. Le bilan en azote est, indépendamment du village, plus déficitaire dans la classe I que dans les deux autres. En effet, la classe I, bien qu'utilisant relativement plus d'azote que les autres, exporte plus par les cultures et par les pertes non-utiles (pertes gazeuses, érosion, lixiviation).

En considérant que les terres de M'Peresso et Noyaradougou contiennent respectivement 800 et 1200 kg/ha d'azote (Q_n) soit 0,02 et 0,03 % et que le bilan de l'azote est de $-28,6$ et $-33,7$ kg/ha/an dans les villages respectifs (KANTÉ 2001), alors la perte annuelle en cet élément sera de 3,6 % à M'Peresso et de 2,8 % à Noyaradougou. Ainsi, le stock résiduel d'azote (N_r) après une année sera de 96,4 et de 97,2 % respectivement à M'Peresso et à Noyaradougou. La quantité résiduelle d'azote (Q_a) après 20 ans (n) peut être calculée selon SMALING (1993b) comme suit : $Q_a = N_r^n * Q_n$. Ainsi, après 20 ans d'exploitation des terres sans une amélioration des pratiques de gestion, il ne restera que 48 et 56 % du stock d'azote respectivement à M'Peresso et à Noyaradougou. La conséquence d'une telle situation est la baisse des rendements des cultures.

Le bilan complet du phosphore respecte les mêmes tendances que celui du bilan partiel. Il est positif dans les deux villages et dans toutes les classes. Comme dans le bilan partiel, sa valeur est relativement plus élevée à Noyaradougou qu'à M'Peresso. En ce qui concerne le phosphore, la différence entre les deux bilans n'est que de 0,7 kg/ha. Ceci est dû à la faible mobilité du phosphore et aux exportations relativement faibles de P par les cultures comparativement à l'azote et au potassium. Le bilan positif en P, autrement dit, la formation du stock de P ne fait qu'augmenter, voire doubler l'efficacité de N, alors qu'une fertilisation en P à un niveau de 1,1 fois le niveau d'exportation entraîne une diminution de la disponibilité de P et donc des rendements (BREMAN, 1998).

Le bilan complet du potassium comme celui de l'azote est négatif indépendamment du village et de la classe (tableau IV). Comme dans le bilan partiel, le déficit en cet élément est moins marqué à Noyaradougou qu'à M'Peresso. Cela peut être dû à la différence de système de culture entre les deux villages. En effet, les résidus de mil et de sorgho exportent 1,5 à 4 fois plus de potassium que ceux du maïs (KANTÉ 2001). La différence de potassium entre les deux bilans oscille entre 10 et 14 kg/ha.

Ainsi, le bilan partiel donne une image en général plus positive que le bilan complet. Le passage du bilan partiel au bilan complet affecte les éléments nutritifs selon leur degré de mobilité et les différences sont plus élevées pour l'azote, suivi du potassium et enfin du phosphore. Les valeurs du bilan complet sont très proches de celles obtenues au Mali-Sud par VAN DER POL (1993) et SMALING (1993a). Ces valeurs auraient été davantage proches si les jachères avaient été prises en compte dans les calculs.

Conclusions et perspectives

Les bilans partiels de NPK du coton sont positifs en raison des apports d'éléments fertilisants qu'exige le coton en tant que culture de rente. Il reçoit l'essentiel des fumures qui contribuent à améliorer les bilans NPK du système de production coton/céréales/élevage.

En termes de bilans partiels de l'exploitation, aucune tendance nette ne se dessine entre les classes. Les bilans partiels de l'exploitation sont positifs à légèrement négatifs pour l'azote, positifs pour le phosphore et en général négatifs pour le potassium. Pour ce dernier, le déficit est plus marqué pour le système de culture basé sur le coton-mil, coton-sorgho que le coton-maïs.

Dans les bilans complets de l'exploitation, l'azote et le potassium sont négatifs pour toutes les classes d'exploitation, tandis que le phosphore reste positif. Le bilan en azote est, indépendamment du village, plus déficitaire dans la classe I que dans les deux autres. La perte annuelle du stock d'azote du sol se situe autour de 3,6 et 2,8 % respectivement à M'Peresso et Noyaradougou. Sans amélioration de la gestion actuelle il ne restera que 48 et 56 % de ce stock dans les 20 prochaines années. Ainsi, des efforts doivent-ils être fournis en matière d'apport d'éléments nutritifs et de leur protection contre les pertes. Le passage du bilan partiel au complet affecte les éléments nutritifs selon leur degré de mobilité et les différences sont plus élevées pour l'azote, suivi du potassium et enfin du phosphore.

L'occupation d'importantes surfaces par les cultures motrices et fréquemment fertilisées comme le coton et le maïs pourra améliorer les bilans d'éléments nutritifs des exploitations agricoles, à condition que l'accès aux engrais soit assuré par les compagnies cotonnières ou les organisations paysannes et que l'apport d'importantes quantités de fumure organique de bonne qualité et les mesures de lutte anti-érosive soient adoptés par les paysans pour minimiser les pertes.

La recherche doit fournir des efforts pour améliorer la fiabilité des données sur les pertes difficiles à mesurer en mettant un accent sur l'utilisation d'éléments marqués dans les études de processus.

Remerciements

Les auteurs remercient Robert Berthé, Toon Defoer, Ibrahime Dembelé, Lassine Dembelé, Loes Kater et Moumine Traoré pour leur forte implication dans la collecte, la saisie et l'organisation des données.

Références citées

- BREMAN H., 1998.** Amélioration de la fertilité des sols en Afrique de l'ouest : Contraintes et perspectives. In: Soil fertility management in West African land use systems. Gestion de la fertilité des sols dans les systèmes d'exploitation d'Afrique de l'Ouest. Renard G., Neef A., Becker K., Von Oppen M.: Proceeding of regional workshop, University of Hohenheim, ICRISAT sahelian and INRAN, Niamey, Niger, 4 – 8 march 1997, p 7-20.
- CAMARA O. S., 1996.** Utilisation des résidus de récolte et du fumier dans le Cercle de Koutiala : Bilan des éléments nutritifs et analyse économique. Rapports PSS No 18, Wageningen, AB-DLO, 120 p.
- CMDT, 2001.** Annuaire statistique 00/01. Résultats de l'enquête agricole permanente. Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles, DPCG, suivi évaluation. CDrom du service Suivi Evaluation de la CMDT.
- CMDT, 2002.** Annuaire statistique 01/02. Résultats de l'enquête agricole permanente. Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles, DPCG, suivi évaluation. CDrom du service Suivi Evaluation de la CMDT.
- CRETENET M., 1996.** Expérimentation des systèmes de culture dans les pays tropicaux : cas des zones cotonnières d'Afrique noire. In Agricultural r&d at the crossroads. Merging systems research and social actor approaches. Budelman, A., Royal Tropical Institute (KIT) the Netherlands, p. 69-80.
- DJOUARA H., SIDIBÉ A., SANOGO Z. J. L. et BENGALY M., 2004.** Amélioration du fonctionnement des unités de production 'UP', 32 p.
- DUGUE P., 1999.** Utilisation de la biomasse végétale et de la fumure animale: Impacts sur l'évolution de la fertilité des terres en zone de savanes. Etude de cas au Nord-Cameroun et essai de généralisation. CIRAD-TERA N° 57/99, 175 p.
- ELIAS E., MORSE S. et BELSHAW D. G. R., 1998.** Nitrogen and phosphorus balances of Kindo Koisha farms in southern Ethiopia. Agriculture, Ecosystems & Environment, (71): 93-113.
- HILHORST T., MUCHENA F., DEFOER T., HASSINK J., DE JAGER A., SMALING E. et TOULMIN C., 2000.** Managing soil fertility in Africa: diverse settings and changing practice. In Nutrients on the move, soil fertility dynamics in African farming systems. Hilhorst T. et Muchena F. (eds) p1-27.
- IER/CMDT, 1987.** Dégradation chimique des sols et possibilités d'amélioration. Document N°3. Réunion IER - CMDT, 10-12 février, N'Tarla, 44 p.

- KANTE S., 2001.** Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 236 p.
- MURWIRA, K. H., SWIFT M. J. et FROST P. G. H., 1993.** Manure as a key resource in sustainable agriculture. In: Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa. Powell J. M., Fernandez-Rivera S., Williams T.O. and Renard C. (eds.) Proceedings of an International Conference, International Livestock Centre for Africa (ILCA), Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993, Volume II, p 131-148.
- NDOUMBE F. M. et VAN DER POL F., 1999.** Integrated Environmental and Economic Accounting : Incorporating soil nutrient depletion in conventional farm accounts. Working Document (Draft 10) KIT. 84 p.
- RAMISCH J., 1999.** In the balance ? Evaluating soil nutrient budgets for an agro-pastoral village of Southern Mali. Managing Africa's soils N° 9, IIED, London, UK. 28 p.
- SCHRADER T. H. et WENNIK B. H., 1996.** La lutte anti-érosive en zone CMDT. Rapport final du projet LAE. Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles (CMDT), Institut Royal des Tropiques (KIT), 66 p.
- SCOONES I. et TOULMIN C., 1998.** Soil nutrient balances: what use for policy ? Agriculture, Ecosystems & Environment 71: 255-267 p.
- SEDOGO, M. P., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : Incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse docteur ès sciences, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 343 p.
- SMALING E. M. A., 1993a.** Appauvrissement du sol en nutriment de l'Afrique Sub - saharienne. In : Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Sub - saharienne. Van Reuler H et Prins W. H. (eds.) VKP. p. 59-75.
- SMALING E. M. A., 1993b.** An agro-ecological framework for integrated nutrient management with spécial reference to Kenya. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 250 p.
- SMALING E. M. A., FRESCO L. O., DE JAGER A., 1996.** Classifying, monitoring and improving soil nutrient stocks and flows in African Agriculture. Ambio 25 (8) : 492-496.
- STOORVOGEL J. J. et SMALING E. M. A., 1990a.** Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983 - 2000. Volume I: Main report (second edition), Staring Centrum, Report 28, SC-DLO, Wageningen, The Netherlands, 137 p.
- STOORVOGEL J. J. et SMALING E. M. A., 1990b.** Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983 - 2000. Volume III: Literature review and description of Land Use Systems, Staring Centrum, Report 28, SC-DLO, Wageningen, The Netherlands, 162 p.
- VAN DEN BOSCH H., OGARO J. N. V. N., MAOBE S. et VLAMING J., 1998.** Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). Monitoring nutrient flows and balances in tree districts in Kenya. Agriculture, Ecosystems & Environment (71) : 63 – 80.
- VAN DER POL F., 1992.** Soil mining: An unseen contributor to farm income in southern Mali; Bulletin KIT 325 . Institut Royal des Tropiques (KIT): Amsterdam.
- VAN DER POL F., 1993.** Analyse et évaluation des options pour une agriculture durable, cas particulier du Sud Mali. In: Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Sub - saharienne. Van Reuler H. et Prins W. H. (eds.) VKP. p. 77-98.
- VAN DER POL F. et AUTISSIER V., 1997.** La valeur de l'épuisement des sols par l'agriculture dans les pays du CILSS. Rapport préliminaire, Club du Sahel, 33 p.
- WALAGA C., EGULU B., BEKUNDA M. et EBANYAT P., 2000.** Impact of policy change on soil fertility management in Uganda. In: Nutrients on the move, soil fertility dynamics in African farming systems. Hilhorst, T. et Muchena F. (eds.) IIED, London, UK. p. 29-44 .