

Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud

Patrice Autfray¹
Fagaye Sissoko²
Gatien Falconnier³
Alassane Ba²
Patrick Dugué⁴

¹ Cirad
NAFRI
PO BOX 7170
Vientiane
Lao PDR
<autfray@cirad.fr>

² IER
CRRRA Sikasso
BP 16
Sikasso
Mali
<fagaye_sissoko@yahoo.fr>
<baalassane_1981@yahoo.fr>

³ Icrisat Bamako
BP 320
Bamako
Mali
<g.falconnier@icrisatml.org>

⁴ Cirad
UMR Innovation
73, rue Jean-François-Breton
34398 Montpellier cedex 5
France
<patrick.dugue@cirad.fr>

Résumé

Dans la zone du Mali-Sud, un des défis pour maintenir la fertilité des sols sous culture continue est d'aborder le partage ou le devenir des biomasses végétales produites par les cultures, nécessaires aux animaux de l'exploitation, d'une part, et au maintien sur le long terme d'un stock organique minimal au niveau de l'horizon de sol travaillé, d'autre part. Une étude a été conduite pour simuler des bilans simplifiés en carbone organique stable de sols cultivés au niveau de trois terroirs différenciés, à partir d'un seuil minimal théorique moyen à maintenir sur la profondeur 0 à 20 cm. Préalablement, nous avons quantifié les différents usages des résidus de récolte de dix exploitations par village selon la typologie couramment utilisée. Avec les pratiques dominantes actuelles de restitutions organiques (enfouissement dans le sol des litières de parcs associées à 25 % de la production totale de fèces de bovins et des reliquats de résidus de cultures restant à terre en fin de saison sèche), tous les types d'exploitation ont présenté des bilans organiques fortement déficitaires. Parmi les différents scénarios d'amélioration envisagés, celui incluant une augmentation de la biomasse produite par unité de surface, associée dans deux des trois villages à l'arrêt du brûlis des résidus et au doublement de l'apport en fèces, permettrait d'envisager un équilibre en termes de bilan organique pour la grande majorité des exploitations sur l'ensemble de leurs champs, tout en gardant le niveau de prélèvement actuel réalisé par les bovins lors de la vaine pâture (*Vp*). Cette démarche originale, associant pratiques paysannes et bilans simplifiés en carbone stable (CS) du sol aux échelles de l'exploitation agricole et du terroir villageois, mériterait d'être appliquée dans d'autres situations au Mali-Sud et plus généralement dans d'autres contextes de polyculture élevage.

Mots clés : bilan humique ; exploitation agricole ; fertilité du sol ; gestion intégrée ; zone soudano-sahélienne.

Thèmes : productions végétales ; sols ; traitements des coproduits et déchets.

Abstract

Crop residue and integrated soil fertility management in mixed crop-livestock systems: A case-study in Southern Mali

In Southern Mali, a debate needs to be engaged within farmer communities to solve the problem of crop residue management in order to satisfy both farm animal feeding and soil fertility maintenance. The aim of this study was to simulate the behaviour of the stable soil carbon (SSC) component at the farm and village levels. We chose specific critical soil carbon levels at 0 to 20 cm depth to be maintained during theoretical permanent cultivation. We quantified the production, the use and the residue behaviour of the main four crops in each of three villages and on 10 representative farms. Yearly SSC balances carried out at the farm level with the most common scenario according to recorded farmers' practices, i.e. stable organic carbon coming from soil incorporation by tillage of 25% of total bovine faeces associated with some decomposed crop residues and

Pour citer cet article : Autfray P, Sissoko F, Falconnier G, Ba A, Dugué P. 2012. Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud. *Cah Agric* 21 : 225-34. doi : 10.1684/agr.2012.0568

remaining field crop residues at the end of the dry season, revealed a strong topsoil SSC deficit at the farm level. In the three villages a scenario which simulated an increase of residue biomass, associated in two of the three villages by stopping the crop residue burning and doubling total bovine faeces incorporated into the soil, would provide sufficient SSC balances for the large majority of farms without any change relating to bovine free-grazing during the dry season. This original approach which links farmers' practices to field SSC balances at both farm and village levels could be used in other situations in Southern Mali and in other mixed-farming contexts where soil fertility maintenance is questionable.

Key words: crop residues; farm management; farmyard manure; semiarid zones; soil fertility.

Subjects: by-products and waste processing; soils; vegetal productions.

Dans les régions de polyculture élevage d'Afrique de l'Ouest, les bilans en matières organiques des sols (MOS) des champs ne sont généralement équilibrés que sur une portion limitée du terroir, située à proximité des lieux d'habitation (Manlay *et al.*, 2002 ; Bationo *et al.*, 2007). Dans la zone du Mali-Sud, ces bilans dépendraient surtout des apports en carbone organique (C) par les déjections animales (Kante, 2001). Ces apports doivent compenser des pertes par minéralisation des MOS, qui sont élevées dans le cadre d'une culture attelée permanente (Bationo *et al.*, 2007). Notre étude s'intéresse au partage des biomasses végétales produites par les cultures, entre ce qui est nécessaire aux animaux des exploitations et à l'entretien de la fertilité des sols cultivés, en utilisant comme indicateur la composante stable du carbone organique du sol, plus communément appelé l'humus du sol (Robin, 1997 ; Manlay *et al.*, 2002).

Matériel et méthode

Caractérisation des sites

L'étude a été réalisée entre juin 2007 et juin 2008 dans trois villages, Fama, Dafara et Dentiola du Mali-Sud, différenciés notamment par le type de céréales cultivées (Soumaré *et al.*, 2008) (*figure 1*).

- Fama, maïs dominant ;
- Dafara, sorgho dominant ;
- Dentiola, mil et sorgho dominants.

Le cotonnier représentait en 2007 respectivement 41, 22 et 16 % de l'assolement de ces trois villages.

Cultures concernées et caractérisation des exploitations suivies

Chaque village a fait l'objet d'un recensement exhaustif des exploitations en suivant la typologie appliquée par la Compagnie malienne de développement des textiles (CMDT) (Djouara *et al.*, 2006) (*tableau 1*). Puis, nous avons sélectionné dix exploitations auprès desquelles nous avons réalisé l'étude sur la quantification des différents usages des résidus de récolte. L'échantillon par site d'étude comprenait deux ou quatre exploitations par type selon leurs fréquences (*tableau 1*). Cette étude n'a pris en compte que les bovins dans le calcul de la charge totale en bétail exprimée en unités bétail tropical (UBT) dans la mesure où ces animaux sont largement dominants dans les systèmes d'élevage.

Quantification des usages des résidus de culture

Les principaux usages des résidus de coton, maïs, mil et sorgho ont pu être quantifiés au champ et sur le lieu de leur stockage. La quantité de matière sèche de résidus produite (*Biom*) a été estimée sur cotonnier et céréales en utilisant des coefficients entre les rendements en coton graine et en grain, et la matière sèche de résidus

(tiges et feuilles) (Defoer *et al.*, 1998). Pour cela, des sous-échantillons de résidus ont été pesés et mis à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures. Pour une tonne de coton graine récoltée ou de grain de maïs, mil et sorgho, les quantités de résidus étaient respectivement de 0,96, 0,85, 5,48 et 5,79 t MS (matière sèche)/ha.

L'équation générale (1) présente les six usages :

$$Biom = Four + Lp + Vp + Bd + Bm + R \quad (1)$$

avec :

- *Four* : résidus consommés dans les parcelles par les animaux de l'exploitation ou stockés pour eux juste après les récoltes ; la quantité stockée a été calculée en prenant le nombre de charretées déclarées et un poids moyen de résidus par charretée (Kante, 2001), soit 135 kg pour le coton, 100 kg pour le maïs, 150 kg pour le sorgho et 250 kg pour le mil. Les prélèvements effectués par les bovins sur les parcelles ont été estimés par des enquêtes auprès des bergers avec 1 % moyen consommé ; pour le coton, nous avons appliqué une consommation moyenne par le bétail de 9 % de la biomasse totale correspondant à la consommation systématique des feuilles juste après la récolte ;
- *Lp* : prélèvements de résidus pour la litière des parcs de nuit de bovins (Kante, 2001) ; leurs quantités ont été estimées à partir d'un nombre de charretées ; on a supposé que l'ensemble de ces apports a été effectué au champ accompagné de

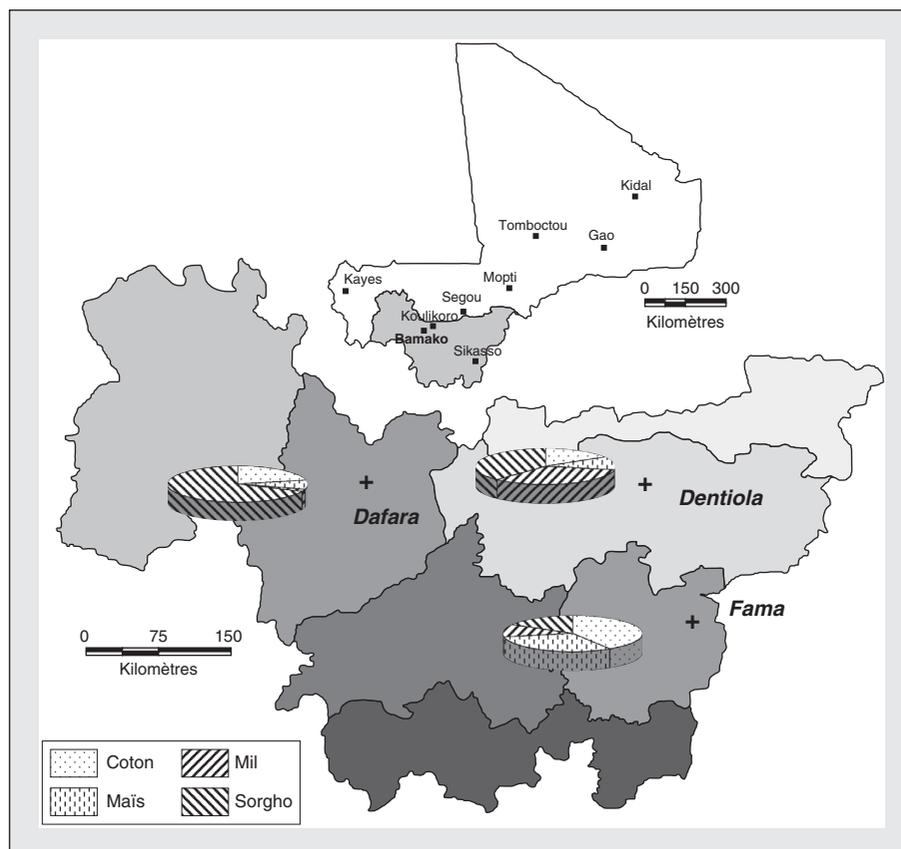


Figure 1. Localisation des trois villages étudiés au Mali-Sud.

Figure 1. Southern Mali and location of the three studied villages.

D'après le zonage de Soumaré *et al.* (2008) : Fama dans la Zone de Sikasso ; Dafara dans la Haute Vallée du Niger et Dentiola dans le Vieux bassin cotonnier ; parts respectives des cultures de coton, maïs, mil et sorgho en 2007.

fèces de bovins dont les quantités ont été estimées par différents scénarios ;
 – Vp : prélèvements liés à la vaine pâture (Vp) par les animaux en divagation intervenant toujours après le passage des animaux de l'exploitation dans les parcelles suivies ; nous avons estimé Vp en réalisant le bilan final suivant l'équation (2) :

$$Vp = Biom - Four - Lp - Bd - Bm - R \quad (2)$$

avec :

- Bd : quantités de résidus brûlées à des fins domestiques par des femmes ;
- Bm : correspond à la quantité de résidus brûlés par les agriculteurs pour faciliter le passage des outils (charrue, appareils à dents) ;
- R : reliquat de résidus restant à terre avant le travail du sol ou le semis direct ;

– la quantité [$Bm + R$] a été estimée avant Bm ; la pesée des résidus a été effectuée à partir de prélèvements sur des placettes élémentaires de 3 m² choisies systématiquement tous les 20 m sur la plus grande diagonale de la parcelle ; leur nombre était proportionnel à la taille de la parcelle qui variait entre 0,2 et 10,7 hectares ; les proportions respectives de Bm et R ont ensuite été estimées par la mesure des superficies brûlées.

Bilans en carbone stable de l'horizon cultivé

Le carbone stable (CS) du sol, des fèces ou des résidus, représente respectivement la partie organique protégée du sol, à minéralisation lente, et la composante organique des fèces ou des résidus végétaux la plus résistante à la dégradation par les

micro-organismes (Robin, 1997). La perte moyenne annuelle de matière organique du sol correspondant au CS du sol a été estimée à partir d'un seuil minimal théorique moyen du C à maintenir et définie par Feller (1995) selon l'équation (3) :

$$C_{critique} \text{ (mg/g sol)} = 0,32 \times (\text{argiles} + \text{limons fins en \%}) + 0,87 \quad (3)$$

Les teneurs moyennes en éléments fins du sol (pourcentage argiles et limons fins) déterminées lors de précédentes études sont pour Fama, Dafara et Dentiola respectivement de 15, 22 et 10 %. Elles définissent les seuils critiques respectifs en mg/g sol de 5,7, 7,9 et 4,1, soit avec une densité apparente moyenne de 1,6 et une minéralisation du sol de 2 %, des pertes en C stable moyennes par an sur 0 à 20 cm de sol pour Fama, Dafara et

Tableau 1. Caractérisation des villages, données moyennes de l'ensemble des exploitations de ces villages et répartition par type des dix exploitations suivies par village.

Table 1. Village and farm characteristics of the three villages and selection procedure of 10 farms per village.

Village (isohyète ^a)	Caractéristiques des villages					Caractéristiques moyennes des exploitations par type				
	% terroir cultivé	Nombre total exploitations (NT)	Habitant/km ²	UBT Bovins/km ²	Apports recyclés ^b (t MS/ha)	Type exploitation CMDT ^c	Part des types (%T)	Superficie totale cultivée ^d (ST, ha)	Nombre moyen UBT bovin ^d (NB)	Nombre exploitations suivies
Fama (1 000 mm)	15	268	28	28,6	2,3	A	48	13,4 (5,9)	23,6 (29,5)	4
						B	36	5,3 (2,4)	3,5 (2,4)	4
						C-D	16	2,8 (1,6)	0,6 (0,5)	2
Dafara (900 mm)	7	45	34	7,9	0,7	A	14	11,0 (5,8)	29,0 (27,5)	2
						B	39	6,2 (3,7)	4,4 (3,3)	4
						C-D	47	2,8 (1,6)	0,9 (1,3)	4
Dentiola (800 mm)	36	151	64	27,5	4,4	A	31	13,5 (7,3)	15,7 (11,1)	4
						B	33	6,2 (2,9)	2,9 (1,6)	4
						C-D	36	4,3 (2,4)	0,4 (0,5)	2

UBT : unités bétail tropical.

^a Isohyètes moyennes annuelles ; période 1975 à 2005.

^b Données non publiées, mélanges variés à l'échelle de la parcelle de déjections animales, fumier, résidus de culture, cendres, déchets ménagers, terre.

^c D'après Djouara *et al.*, 2006 : type A : nombre de paire de bœufs d'attelage supérieur à deux et nombre UBT supérieur à dix ; type B : un ou deux paire (s) de bœuf d'attelage et nombre UBT inférieur à 10 ; type C-D : début d'équipement attelé ou culture manuelle.

^d Entre parenthèses écart-types de la moyenne (ETM).

Dentiola, estimées respectivement à 360, 500 et 260 kg/ha par an. L'apport en CS au sol a été estimé pour les fèces de bovins et les résidus de récolte d'après Robin (1997) selon l'équation suivante (4) :

$$CS (\%) = 0,3221 \times SOL - 0,7155 \times HEM + 0,6717 \times CEL + 1,8919 \times LIG + 0,0271 \times MM \quad (4)$$

avec :

- MM = % matières minérales = 100 - MO ;
- MO = % matières organiques ;
- SOL = % solubles ;
- HEM = % hémi-cellulose ;
- CEL = % cellulose ;
- LIG = % lignine.

Les bilans simplifiés en CS du sol ont été réalisés pour chacun des trois types d'exploitation par village et

ensuite à l'échelle du village en effectuant la moyenne par hectare des bilans obtenus pour l'ensemble des superficies cultivées des exploitations du village (*figure 2*). Six scénarios de gestion des résidus et des fèces des bovins ont été simulés, avec comme extrêmes, une référence de la pratique actuelle dominante (S1), et une référence d'une situation avec un investissement maximal en travail (S6) :

- S1 : situation fréquente dans les villages de Fama et Dafara, avec comme restitutions organiques les reliquats laissés au sol (R), les résidus de culture apportés au niveau des litières de parc (Lp) et les apports en CS issus des fèces produits dans les enclos la nuit en saison sèche ; c'est également une situation dominante au niveau de Dentiola ;

- S2 : situation parfois acquise dans certaines exploitations du village de Dentiola avec une production de fumure animale la nuit dans les parcs fixes ou enclos tout au long de l'année par l'ensemble des bovins de l'exploitation (Landais et Lhoste, 1993) ;
- S3 : scénario d'un arrêt total du brûlis des résidus et d'un recyclage de ces résidus par la litière des bovins pour la production de fumier ou apport direct au sol avant semis ; cette pratique est de plus en plus fréquente au niveau du village de Dentiola ;
- S4 : scénario d'une augmentation moyenne du rendement en biomasse de résidus de culture de 1 t/ha notamment par la pratique de cultures associées ; cette dernière pratique est réalisée au niveau des villages de la zone de Sikasso (association maïs et

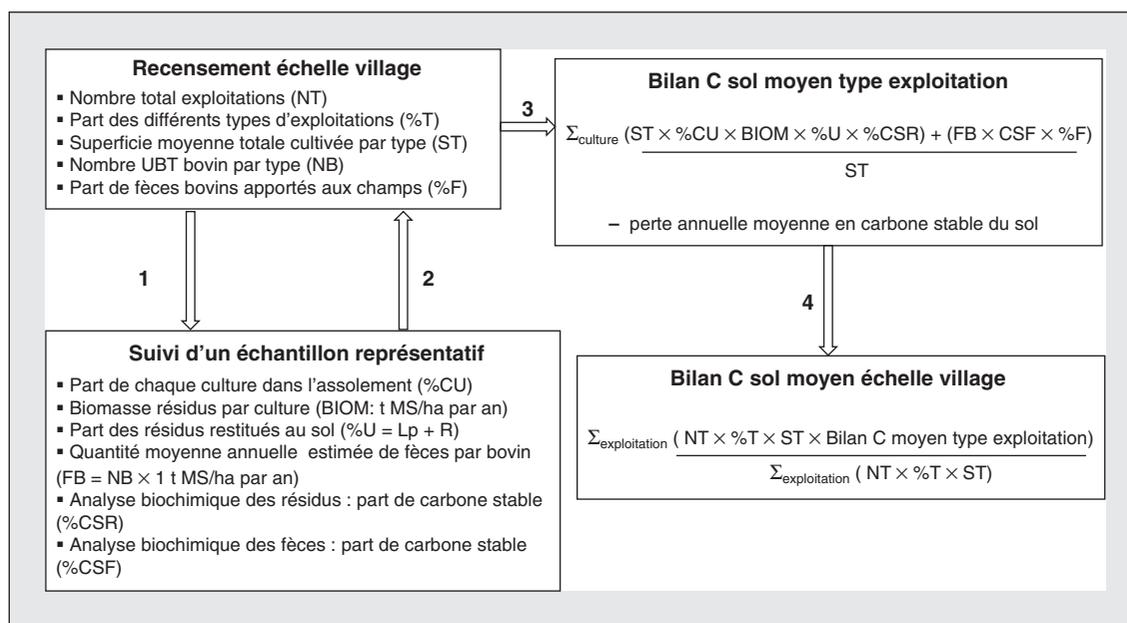


Figure 2. Les quatre étapes de la démarche utilisée pour le calcul des bilans simulés en carbone stable du sol sur 0 à 20 cm (kg/ha par an) à l'échelle de l'exploitation et des villages.

Figure 2. The four steps of the global approach used for stable soil carbon balances at a depth of 0 to 20 cm (kg/ha per year) at the farm and village scales. UBT : unités bétail tropical.

mil ; Ramisch, 2005) et du Vieux bassin cotonnier (association maïs et niébé ; Blanchard, 2010) ;

– S5 : étant une combinaison des améliorations des scénarios 2, 3 et 4, avec une synergie possible entre S2 et S4, l'augmentation de l'apport de fèces devant avoir un effet direct d'augmentation de la biomasse produite (Landais et Lhoste, 1993) ;

– S6 : scénario d'appropriation individuelle totale des résidus de culture avant la *Vp*, avec une gestion des animaux en stabulation fixe à 75 %, pâturant dans la journée en saison des pluies dans des zones limitrophes aux champs (25 %) et nourris en saison sèche à partir de prélèvements de résidus de céréales ; les 75 % des fèces seraient restitués au champ avec l'ensemble des tiges de cotonnier et de céréales restantes après stockage des quantités nécessaires pour les bovins (arrêt du brûlis maïs sans augmentation de la biomasse). Pour chaque scénario, nous avons fait les hypothèses que :

- nous avons à l'échelle du terroir villageois la possibilité de satisfaire entièrement les besoins fourragers des troupeaux ;
- les effectifs de bovins ne variaient pas selon les saisons ;

- les troupeaux transhumants rarement observés n'interféreraient pas avec le calcul des bilans.

Résultats et discussion

Usages moyens des résidus de culture selon les villages et les cultures

Le site de Dentiola s'est distingué très nettement des villages de Fama et Dafara avec un faible reliquat de résidus (*R*) de culture laissé au sol, entre 2 et 10 % de la quantité totale, selon le type de résidus (*tableau 2*). À Dentiola, l'espace cultivé occupait une plus forte proportion du terroir (36 %), accroissant ainsi la pression sur les résidus de récolte par les bovins présents à forte densité démographique (27,5 UBT/km²) (*tableau 1*). Ces fortes pressions humaines et animales en zones semi-arides ont été souvent décrites (Kante, 2001 ; Dugué *et al.*, 2004 ; Blanchard, 2010). Les tiges de cotonnier ont été fortement valorisées pour la production de fumier à Dentiola (à 57 %). Par contre à Fama et

Dafara, leur brûlis a représenté respectivement, 69 et 70 % de la production totale de tiges. Dans les trois villages, les pailles de maïs ont constitué la ressource en résidus de récolte la plus recherchée pour l'alimentation du bétail d'abord par une gestion individualisée au niveau de l'exploitation (*Four*) (21 à 43 %) ensuite par la *Vp*. Elles ne sont jamais brûlées car leur fragmentation durant la saison sèche permet de les enfouir sans contrainte particulière. Les pailles de sorgho et de mil ont représenté en quantité la principale source de résidus de récolte fourrager (*Four + Vp*), du fait de rendements moyens autour de 4 t MS/ha, et des proportions de ces cultures dans l'assolement total de 28, 70 et 72 %, respectivement pour Fama, Dafara et Dentiola (*tableau 2*).

Usages des résidus de culture selon le type d'exploitation

La part de résidus de culture valorisée au niveau de l'exploitation par une gestion individualisée (*Four + Lp*) a été toujours plus élevée dans les exploitations de grande taille et bien équipées de type A, moindre pour le

Tableau 2. Les usages moyens des résidus des quatre cultures des dix exploitations sélectionnées pour chaque village, associés aux quantités moyennes de résidus et aux proportions de chaque culture dans l'assolement.

Table 2. Proportion of four crop residue uses of the 10 selected farms in the three villages with average residue quantities and the mean proportion of each crop in the total farm area.

Culture	Village	Quantité moyenne de résidus (t MS/ha)	Part moyenne des cultures (%)	Usages moyens des résidus (%)					
				Utilisé par le bétail		Brûlé		Restitué au sol	
				Fourrage exploitation (Four)	Vaine pâture (Vp)	Brûlis domestique (Bd)	Brûlis mécanique (Bm)	Litière de parc (Lp)	Reliquat (R)
Coton	Fama	0,8	41	9 ^a	3	55	14	3	16
	Dafara	0,6	22	9 ^a	0	13	57	0	21
	Dentiola	0,4	16	9 ^a	13	0	19	57	2
Maïs	Fama	2,1	31	21	40	0	0	0	39
	Dafara	1,9	8	43	10	0	0	0	47
	Dentiola	1,4	12	40	38	0	0	18	4
Mil	Fama	5,3	11	11	77	0	12	0	0
	Dafara	2,8	2	0	38	0	0	0	62
	Dentiola	4,4	34	9	65	9	4	3	10
Sorgho	Fama	4,1	17	12	52	0	36	0	0
	Dafara	4,4	68	0	66	0	15	0	19
	Dentiola	3,9	38	32	52	0	6	3	7

MS : matière sèche.

^a Estimation moyenne d'après Dugué, communication personnelle.

type C-D et intermédiaire pour le type B (figure 3). Cela s'explique par un meilleur niveau d'équipement en charrettes dans ce type d'exploitation, une main-d'œuvre numériquement plus importante et une taille du troupeau plus élevée qui permettent de recycler facilement les pailles de céréales et tiges de cotonnier via la production de fumier (Kante, 2001 ; Djouara *et al.*, 2006 ; Blanchard, 2010). À Dafara, les exploitations quelles que soient leurs tailles avaient peu développé la gestion individualisée des résidus pour l'affouragement de leurs bovins du fait d'une bonne disponibilité en parcours naturels dans ce village, la proportion de terroir cultivé étant seulement de 7 % (tableau 1). La quantité moyenne de résidus produite par hectare variait selon le type d'exploitation A, B ou C-D (figure 3). Cette relation entre la structure d'exploitation et la producti-

tivité des cultures avait été déjà décrite, avec une relation entre la taille des exploitations, l'utilisation d'engrais et de fumure organique (Kante, 2001 ; Djouara *et al.*, 2006), qui expliquerait ces différences à Dafara et Dentiola. À Fama, les exploitations de type C-D échapperaient à cette règle car elles avaient une forte proportion de céréales traditionnelles (mil et sorgho) dans leurs assolements, reconnues moins exigeantes en termes de fertilité (Soumaré *et al.*, 2008).

Bilans en carbone à l'échelle de l'exploitation et du terroir villageois

La teneur en CS par tonne d'apport de nature organique, estimée par analyse, était similaire pour les fèces de bovins (256 kg de CS par tonne d'apport) et les tiges de cotonnier (240 kg de CS

par tonne d'apport), en raison notamment de leurs richesses en lignine (tableau 3). Les valeurs étaient assez proches pour les tiges de sorgho et de mil (151 et 161 kg de C stable par tonne) et inférieures pour les tiges de maïs (116 kg de C stable par tonne). En supposant que les fèces analysés proviennent de bovins ayant consommé principalement des résidus de céréales, nous confirmons que la transformation des résidus par les ruminants en fèces concentrent le CS, tout en améliorant la qualité par une augmentation de la teneur en azote (Landais et Lhoste, 1993). Une première analyse des scénarios montre sur les bilans en CS des sols, que la situation est de plus en plus défavorable à mesure que la taille des exploitations décroît (tableau 4). Une étude réalisée dans la zone de Sikasso concluait également que les bilans minéraux sous cultures étaient mieux expliqués par

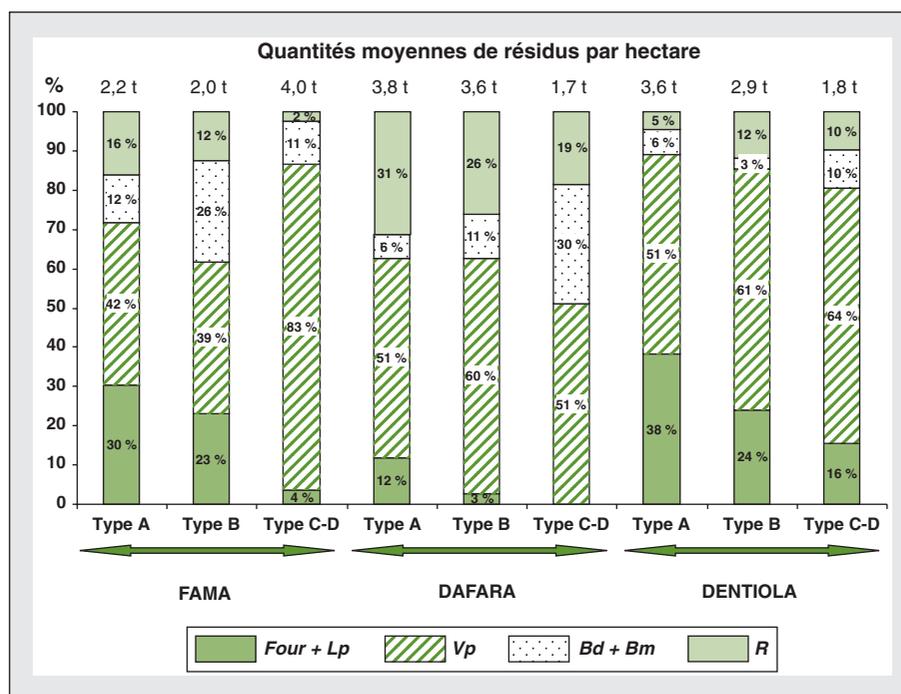


Figure 3. Quantités moyennes de résidus et valorisation moyenne des résidus en pourcentage des quantités, toutes cultures confondues et par type d'exploitation pour les trois villages (dix par village).

Figure 3. Average residue quantities and average development (in percentage) of quantities of all crops and by farm type for the three villages (10 farms per village). Four : Fourrage exploitation ; Lp : litière de parc ; Vp : vaine pâture ; Bd : brûlis domestique ; Bm : brûlis mécanique ; R : reliquat.

les différenciations des pratiques par type d'exploitation, que par l'éloignement des parcelles par rapport aux lieux d'habitation (Ramisch, 2005). Les bilans organiques avec les scénarios actuels les plus courants, c'est-à-dire soit avec une restitution totale des fèces

produites en enclos ou parc de nuit, soit en saison sèche uniquement (S1) ou soit pendant toute l'année (S2), montrent que l'entretien de cette composante de la fertilité des sols n'est pas assuré pour la majorité des exploitations. La simulation de l'arrêt total du

brûlis des résidus (S3) aurait un impact sensiblement similaire à S2 sur l'entretien organique du sol que cela soit à l'échelle de l'exploitation (tableau 4) ou du terroir (figure 4). Le scénario 4 qui simule une augmentation de la biomasse de résidus de culture (+ 1 t

Tableau 3. Quantités de carbone stable estimées par analyse biochimique des résidus de culture et des fèces de bovins.

Table 3. Organic stable carbon estimates of crop residue and cattle faeces from biochemical analysis.

Type apport organique ^a	Date prélèvement	Analyses biochimiques (%)							Tr ^b : indice de stabilité des MO (%)	C stable (kg/t)
		Matières minérales (%)	Carbone (%)	Azote (%)	Matières organiques (MO)					
					Solubles (%)	Hémi-cellulose (%)	Cellulose (%)	Lignine (%)		
Tiges de cotonnier	Octobre	5,2	45,4	0,58	23,6	16,8	45,6	14,0	52,9	240
Pailles de maïs	Septembre	7,2	43,9	0,50	15,2	32,5	44,6	7,7	26,4	116
Pailles de mil	Novembre	5,8	45,5	0,48	15,9	28,5	44,9	10,7	35,3	161
Pailles de sorgho	Novembre	4,1	46,2	0,29	17,5	28,7	44,4	9,4	32,8	151
Fèces de bovins	Janvier	21,1	39,7	1,50	28,9	18,1	26,7	26,3	64,5	256

^a Chaque analyse a été faite sur un échantillon moyen constitué de six prélèvements (deux par village).

^b D'après Robin, 1997.

Tableau 4. Bilan en carbone stable du sol sur 0 à 20 cm selon six différents scénarios (S1 à S6) pour les trois villages concernant les dix exploitations par village suivies.

Table 4. Stable soil carbon balances calculated at a depth of 0 to 20 cm in six different scenarios (S1 to S6) of crop residue biomass and management of the 10 selected farms in the three villages.

Village	Type ^a	Nombre total exploitation ^a	Superficie totale cumulée ^a (ha)	Bilan C stable du sol sur 0 à 20 cm ^b (kg CS/ha/an) selon différents scénarios			Innovations associées	Changement collectif	
				Pas d'innovation	Innovations isolées	Innovations associées			
				S1 : actuel dominant apports en CS : $R + Lp + 25\%$ de fèces	S2 : récupération fèces de nuit toute l'année apports en CS : $R + Lp + 50\%$ de fèces	S3 : arrêt du brûlis apports en CS : $R + Lp + Bd + Bm$ $+ 25\%$ de fèces	S4 : augmentation biomasse apports en CS : $R + Lp + 25\%$ de fèces + 1 t/ha pailles céréales ^c	S5 : S2 + S3 + S4	S6 : appropriation individuelle des résidus apports en CS : disponible résidus ^d + 75 % de fèces
Fama	A	129	1 724	- 196	- 83	- 91	- 53	165	87
	B	96	511	- 279	- 236	- 166	- 136	19	- 28
	C-D	43	120	- 332	- 318	- 225	- 189	- 69	236
Dafara	A	6	69	- 154	15	- 88	- 11	224	130
	B	18	109	- 311	- 265	- 244	- 168	- 56	34
	C-D	21	59	- 427	- 407	- 349	- 284	- 185	- 247
Dentiola	A	47	632	- 122	- 48	- 63	21	155	292
	B	50	309	- 157	- 127	- 110	- 14	63	178
	C-D	54	234	- 199	- 193	- 171	- 56	- 22	16

Lp : litière de parc ; Vp : vaine pâture ; Bd : brûlis domestique ; Bm : brûlis mécanique ; R : reliquat.

^a D'après *tableau 1*.

^b Calculs effectués, *figure 2* : pour des besoins en C stable du sol estimés à Fama, Dafara et Dentiola respectivement à 360, 500 et 260 kg/ha par an ; estimations des fèces excrétées, 1 t MS/UBT par an (Landais et Lhoste, 1993).

^c D'après *tableau 3*, 1 t de pailles de céréales apportent en moyenne 143 kg de carbone stable.

^d Résidus disponibles estimés après soustraction d'une consommation théorique de résidus en saison sèche comme fourrage de 6,25 kg MS j/UBT soit sur six mois, 1,15 t MS/UBT (Landais et Lhoste, 1993).

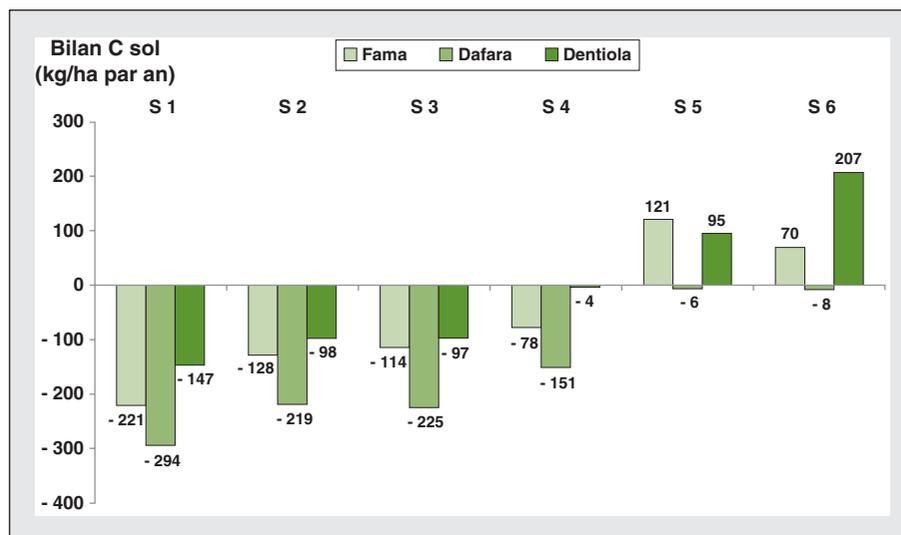


Figure 4. Bilans simulés en carbone du sol sur 0 à 20 cm (kg/ha par an) à l'échelle du terroir villageois selon les données et les scénarios donnés dans le tableau 4.

Figure 4. Stable soil carbon balances at a depth of 0 to 20 cm (kg/ha per year) at the village scale according to the data and scenarios given in table 4.

MS/ha) aurait un impact plus important que les scénarios 2 et 3, notamment à Dentiola, avec un bilan proche de l'équilibre entre les entrées et les sorties de CS à l'échelle du village. Seul le scénario 5 qui simule l'association des innovations des scénarios 2, 3 et 4, c'est-à-dire avec la récupération de toutes les déjections des bovins toutes les nuits, l'arrêt du brûlis et une augmentation de production de biomasse de résidus, permettrait d'envisager des bilans satisfaisants pour la majorité des exploitations à Fama et Dentiola (figure 4). À Dafara, le bilan serait presque équilibré à l'échelle du village mais nécessiterait un meilleur partage des ressources entre les exploitations (tableau 4). Le scénario 6 qui simule un niveau d'innovation avec un investissement maximal en termes de gestion de la fertilité des sols et des animaux, et qui exigerait un changement radical dans le mode d'accès aux ressources fourragères, n'apporterait pas globalement d'importantes améliorations en termes de bilan organique des sols.

Conclusion

En tenant compte des scénarios actuels, les bilans en CS des sols

simulés sur l'ensemble des champs cultivés des exploitations concernées ont montré qu'il y aurait au niveau des trois villages un déficit important en matières organiques du sol. Cette situation est principalement liée à :

- un déficit en biomasse produite sur l'espace cultivé ;
- une insuffisance des prélèvements de résidus de récolte pour la production de fumier ;
- un nombre de bovins et un équipement insuffisant au niveau des moyennes et petites exploitations.

À l'échelle du terroir villageois, il existe un transfert de fertilité de ces dernières vers les plus grandes exploitations qui possèdent les plus grands troupeaux, responsables de la majeure partie des prélèvements de résidus de céréales lors de la *Vp*. L'analyse de scénarios innovants montre qu'il serait nécessaire pour les trois villages d'avoir une augmentation de la biomasse produite en résidus de culture par unité de surface pour améliorer significativement les bilans en CS des sols. Dans deux des trois villages, d'autres innovations comme l'arrêt du brûlis des résidus et la valorisation totale des fèces produites par les bovins en parage de nuit durant toute l'année, pourraient améliorer sensiblement ces bilans. Cette démarche simplifiée et

originale, devrait pouvoir s'adapter aux :

- variabilités interannuelles en termes de production des cultures et des assolements ;
- spécificités des villages et de leurs sols ;
- évolutions des exploitations.

Plus généralement, elle pourrait être appliquée dans d'autres contextes de polyculture élevage, comme un premier cadre conceptuel de réflexion de gestion intégrée des biomasses disponibles à l'échelle d'un terroir. ■

Remerciements

Les auteurs remercient Philippe Lhoste pour ses conseils sur le texte.

Références

Bationo A, Kihara J, Vanlauwe B, Waswa B, Kimetu J, 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 94 : 13-25.

Blanchard M, 2010 *Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud : savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture-élevage*. Thèse de doctorat, université Paris-Est Créteil. <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/58/23/35/PDF/TH2010PEST1047.pdf>

Defoer T, De Groote H, Hilhorst T, Kanté S, Budelman A, 1998. Participatory action research

and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali: a fruitful marriage? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71 : 215-28.

Djouara H, Belières JF, Kébé D, 2006. Les exploitations agricoles familiales de la zone cotonnière du Mali face à la baisse des prix du coton-graine. *Cahiers Agricultures* 15 : 64-71.

Dugué P, Vall E, Lecomte P, Klein HD, Rollin D, 2004. Évolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Oléagineux Corps gras Lipides* 11 : 268-76.

Feller C, 1995. La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanaise. *Agriculture et Développement* 8 : 35-41.

Kante S, 2001. *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud*. Documents sur la Gestion des Ressources Tropicales n° 38. Wageningen : Wageningen University and Research Centre.

Landais E, Lhoste P, 1993. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. II. Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. *Cahiers Agricultures* 2 : 9-25.

Manlay R, Chotte JL, Masse D, Laurent JY, Richard D, 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna. III. Plant and soil components under

continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 : 249-69.

Ramisch JJ, 2005. Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105 : 353-72.

Robin D, 1997. Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organominéraux. *Agronomie* 17 : 157-71.

Soumaré M, Bazile D, Vaksman, Kouressy M, Diallo K, Diakité CH, 2008. Diversité agroécosystémique des céréales traditionnelles au sud du Mali. *Cahiers Agricultures* 17 : 79-85. doi: 10.1684/agr.2008.0184.