

Matière organique et éléments minéraux déplacés par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère, ou mixtes en savane soudanienne (Burkina Faso).

BILGO* A., HIEN* V., SERPANTIE* G, MASSE*** D, CHOTTE J.L.***, FOURNIER** J., ZAONERO** P.**

Résumé

Les pertes en matières organiques, en éléments minéraux et en biomasse microbienne par érosion hydrique ont été mesurées sur des parcelles expérimentales de 1998 à 2001 sur sol ferrugineux tropicaux lessivés sableux en zone cotonnière du Burkina Faso. Différents modes de gestion ont été testés : culture permanente sur billons (rotation coton/maïs sur parcelle cultivée depuis 10 ans), jachères à herbacées, jachère arbustive de longue durée, parcelles mixtes de jachères à l'aval de culture.

1) En année à pluviosité annuelle normale (environ 800 mm), le ruissellement et l'érosion sont faibles ou nuls dans les jachères (ruissellement 0 à 13%, érosion 0 à 1,4 t.ha⁻¹) et élevées dans les cultures (ruissellement 20 à 26%; érosion 4 à 15 t.ha⁻¹). Les sols et sables charriés représentent 15 à 20 % de l'érosion seulement. Les teneurs en carbone de cette charge grossière sont faibles (1 à 4 g.kg⁻¹) et augmentent après le travail du sol tel que le buttage (15 à 20 g.kg⁻¹). La charge solide en suspension représente l'érosion principale, en quantité comme en qualité. Elle concentre les fractions fines du sol (66 à 86% d'argile+limons fins) et présente toujours de fortes teneurs en carbone (28 à 55 g.kg⁻¹), d'azote (1,6 à 4,1 g.kg⁻¹) et de phosphore assimilable (50 à 160 mg.kg⁻¹) comparé aux teneurs faibles du sol. Le carbone et les éléments minéraux déplacés sont fortement déterminés par les quantités de terres déplacées. Ils sont pratiquement nuls sur les jachères. Dans la parcelle cultivée le carbone du sol déplacé varie de 108 à 350 kg.ha⁻¹, l'azote total de 8 à 27 kg.ha⁻¹, le phosphore assimilable de 270 à 727 g.ha⁻¹. Ce déplacement est totalement absorbé par une jachère de 10 m d'*Andropogon gayanus* à l'aval de 40 m de culture cotonnière.

2) En année décennale à pluviosité élevée (1150 mm en 1999), sur culture, le ruissellement (38%) augmente par remontée de nappe. L'érosion (37 t/ha/an) et les pertes de carbone (771 kg.ha⁻¹) et d'éléments minéraux (58 kgN.ha⁻¹) sont 3 à 4 fois plus importantes qu'en année normale. Les jachères ruissellent alors plus, suite à la remontée de la nappe. Le carbone et l'azote déplacés sont respectivement de 160 kg.ha⁻¹ et 10 kg.ha⁻¹ dans la jachère de longue durée riche en litière. Dans la parcelle mixte culture amont/jachère aval à *Andropogon gayanus* (brûlé en 1999) les pertes de carbone et d'azote en été respectivement de 348 kg.ha⁻¹ et 22 kg.ha⁻¹, soit la moitié de la parcelle cultivée.

En conclusion, sous culture, des pertes appréciables en fertilisants et en matière organique du sol se produisent chaque année de manière insidieuse, mais plus gravement les années décennales humides, contribuant à un bilan organo-minéral défavorable. Ces pertes sont susceptibles d'être retenues par absorption des ruissellements par des couverts pérennes de jachères se trouvant à l'aval, en particulier lorsque le sol est très filtrant mais s'encroûte et se tasse à la base du labour.

Mots clés : Burkina Faso – érosion hydrique– transferts de carbone – bilan minéral – jachère – *Andropogon gayanus*

Organic matter and mineral elements transfer by erosion on crops, fallow and mixed plots in sudanian savannas (Burkina Faso)

Abstract:

From 1998 to 2001, the losses of organic matter, nutrients and microbial biomass by erosion were measured on runoff plots over ferruginous tropical leached sandy soils (Alfisol) in Bondoukui, a village in the Burkina Faso cotton zone. Various managements were tested : permanent ridged cropping (rotation coton/maïs on a ten years cultivated field), herbaceous fallow, shrubby fallow, cotton with a grassfallow (10m) at the bottom of the runoff plot (50m).

1) Under normal annual rainfall (800 mm) runoff and erosion are low in the fallow (runoff 0 to 13%, erosion 0 to 1,4 t/ha/year and high in the crops (runoff= 20 to 26%; erosion 4 to 15 t/ha/year). The swept soil and sands only account for 15 to 20 % of erosion. The percentages of carbon of this coarse load are weak (1 to 4 g.kg⁻¹). They increase after the tillage such as ridging (15 to 20 g.kg⁻¹). Fine solid suspension is the principal erosion, in quantity as in quality. It concentrates the fine fractions of the soil (66 to 86% of clay+ fine silt) which present always of high contents of carbon (28 to 55 g.kg⁻¹), nitrogen (1.6 to 4.1 g.kg⁻¹) and available phosphorus (50 to 160 mg.kg⁻¹) compared with the low contents of the soil. Carbon and nutrients are strongly determined by the erosion amount. They are practically zero on the fallow. In the crop, eroded carbon varies from 108 to 350 kg.ha⁻¹ the nitrogen from 8 to 27 kg.ha⁻¹, the available phosphorus from 270 to 727 g.ha⁻¹. This displacement is completely absorbed by a fallow of 10m of *Andropogon gayanus* to the downstream of 40m of cotton plant.

2) In a decennial high rainfall (1150 mm in 1999) year, on crop, the runoff (38%) increases with the watertable. Erosion (37 t/ha/year), carbon losses (771 kg/ ha) and nutrients (58 kg N ha⁻¹) are 3 to 4 times more than in normal year. The fallow produces more runoff, following the increase of watertable. Moved carbon and nitrogen are respectively of 160 kg.ha⁻¹ and 10 kg.ha⁻¹ in the rich-in-litter fallow of long duration. In mixed plots (the fallow was burnt this year) transfers of carbon and nitrogen attained respectively of 348 kg.ha⁻¹ and 22 kg.ha⁻¹, half of the cultivated plot.

In conclusion, losses of fertilizers and organic matter of the soil occur each year in an insidious way but more seriously during the wet decennial years, contributing to a unfavourable organomineral balance. These losses could be absorbed near the fields by perennial fallow placed on the ways of runoff particularly when the soil is well drained but encrusted and packed at the base of the ploughing.

Key words: Burkina Faso, runoff erosion, carbon transfers, organo-mineral balance, fallows, grassline, *Andropogon gayanus*

I. Introduction

Dans la zone tropicale sèche d'Afrique de l'Ouest, l'érosion joue un rôle important dans la baisse de fertilité et la dégradation des espaces cultivés (Lal, 1975 ; Roose, 1994). Wischmeier et Mannering (1969), Casenave et Valentin (1989) et Roose (1994) lient l'érosion « de nappe » à la capacité de la pluie à désolidariser les constituants du sol par effet splash. L'impact des gouttes de pluie provoque le fractionnement au moins partiel des agrégats, favorise la dispersion de la phase argileuse, la mise en suspension des fractions fines et l'individualisation du squelette (Casenave et Valentin, 1989). Une croûte de surface se forme par colmatage de la porosité (Casenave et Valentin, 1989 ; Juo et al., 1995). Le ruissellement est un facteur d'exportation des produits fins de la désagrégation. Si sa compétence (forte longueur de pente, forte intensité de ruissellement, canalisation, turbulence) est suffisante, il entraîne aussi des éléments grossiers et des agrégats. A partir d'une certaine

puissance, une érosion linéaire (griffes, rigoles) peut s'ajouter à l'érosion ~~en nappe~~. Tous les facteurs physiques de l'érosion sont influencés par l'action de l'homme dans les aménagements des versants, l'architecture des couverts végétaux installés ou exploités et les pratiques culturales. Il se dégage de ce fait un potentiel de production de sédiments qui est fonction du type de sol et de son mode de gestion. Ainsi les horizons de surface de la plupart des sols tropicaux à dominance kaolinitique perdent progressivement leur structure quand ils sont mis en culture et deviennent alors particulièrement susceptibles au ruissellement et à l'érosion de nappe. La couverture de la surface du sol telle la jachère naturelle (Roose, 1994), les prairies artificielles (cas de *Andropogon gayanus*, Fournier et al., 2000), les plantes de couverture ou les couvertures mortes (paillage, résidus de récolte ; Roose et Bertrand, 1971), limitent le ruissellement et l'érosion. Les systèmes de culture permanente associés à des pratiques culturales à base de travail du sol aggravent les risques érosifs, compte tenu des périodes prolongées où le sol est découvert et ameubli (Roose, 1980 ; Maass et al., 1988 ; Pieri, 1989 ; Lal, 1975). De nombreuses études ont caractérisé les pertes en terre (Roose, 1980 ; Pontanier et al., 1986 ; Casenave et Valentin, 1989). Celles concernant les pertes organiques, minérales et biologiques qui les accompagnent ont encore rarement été conduites en zone soudanienne. La question d'échelle est essentielle, tant du point de vue de l'agriculteur que du point de vue des transferts d'éléments au sein de l'environnement. Le paysan a intérêt à réduire les déplacements d'éléments nutritifs à grande distance et à les conserver au sein de son domaine de culture (Fournier et al., 2000). Ceci pose la question des effets des successions d'états de surface le long d'une pente cultivée sur le bilan d'érosion. Les études ont surtout concerné la mesure d'un potentiel d'érosion (méthode USLE sur une surface limitée de 100 m² et 20 m de longueur de pente) adapté à la mesure de ruissellement potentiel de nappe (Wishmeier, 1974). Au-delà de 20m et en modelé billonné, une érosion linéaire s'ajoute à l'érosion en nappe.

Sur des expérimentations menées au Burkina Faso, Fournier et al.(2000), ont étudié les phénomènes de ruissellement et d'érosion sous pluie naturelle, pour des états de surface simples ou composites. Le dispositif est constitué de parcelles de grande longueur de pente (50 m) reproduisant les principaux états d'occupation (culture, jachère courte, jachère longue) et principales associations d'états (culture en amont, jachère en aval) des zones soudanienues. Notre recherche à partir du même dispositif concerne plus spécifiquement, les bilans de carbone, macro-éléments et biomasse microbienne.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Cadre de l'étude et site expérimental

Les expériences ont été réalisées dans la région de Bondoukui (11°49N, 3°49W ; 360 m d'altitude) dans l'Ouest du Burkina Faso. Deux parcs de parcelles ont été construits en 1997 sur un plateau gréseux recouvert de sols de type ferrugineux tropical lessivés hydromorphes, de pente moyenne 1%. Le climat est de type sud soudanien avec une saison sèche de 7 mois et une pluviosité moyenne annuelle de 900 mm. L'agriculture combine des cultures vivrières (maïs, sorgho) et une culture commerciale (coton) en rotation, sur une dizaine d'années avant remise en jachère. Les techniques culturales sont basées sur le labour attelé, des engrais minéraux à faible dose et des sarclages à dominante manuelle. Le modelé des champs paysans est billonné, les billons suivant une pente moyenne de 1%. L'élevage est extensif, une grande partie des troupeaux transhume en saison sèche vers les pâturages du sud.

2.2 Dispositif expérimental

Le premier parc expérimental contient 8 parcelles isolées mesurant 50 m x 3,2 m, à modelé billonné. Elles sont disposées dans le sens de la pente (1%) sur un sol filtrant ferrugineux lessivé modal (Fournier et *al.*, 2000). Nous en avons retenu 3 dans le cadre de cet article. Les traitements appliqués aux parcelles sont :

- parcelle à état de surface simple CULT : rotation coton/maïs sur billons. Une parcelle de 20m, double cette parcelle en 1999.
- parcelle à état de surface simple JAC : jachère en défens à dominante herbacée exceptée en 1999 (cotonnier sur paillis)
- parcelle à état de surface composite CULTAG : rotation annuelle coton-maïs (comme CULT) sur billons sur 40 m suivie à l'aval de 10 m de prairie permanente à base de *Andropogon gayanus* en défens dont les résidus restent sur le sol en saison sèche.

Le second parc comporte 3 parcelles dont une seule a été retenue pour cet article. Il s'agit d'une jachère arbustive dense de 20 ans sur une parcelle de dimension 25 m x 6,5 m (JAL).

Chaque parcelle est équipée à l'aval d'une fosse de décantation de la charge solide la plus grossière (charriage), d'un partiteur étalonné (facteur 1/25 environ) et d'un ou deux fûts de réception des eaux chargées de matière solide en suspension qui seront jaugés, échantillonnées (0,66l par fût) puis micro-filtrées sous aspiration à 0,2µm. Chaque parc comporte un pluviographe placé à 1m de hauteur. Un des problèmes posés par la mesure de l'érosion est la nature « catastrophique » de l'événement érosif de récurrence décennale. Les dispositifs de mesure sont généralement dimensionnés pour être sensibles, et de ce fait sous-dimensionnés pour les crues décennales. Dans notre cas, malgré l'existence de légers débordements des fûts en 1999, la présence d'une parcelle cultivée de 20m dont les fûts n'ont pas débordé et dont la réponse en terme de ruissellement est identique à celle de 50m ($R_{mm50}=1,03R_{20}+0,5$, $r^2=0,93$) nous a permis d'estimer les quantités d'eau ruisselées sur les parcelles de 50m pendant les événements exceptionnels de 1999.

Les parcelles cultivées sont labourées à la charrue en début de campagne avant les semis, désherbées en période de levée et sarclées à la demande. Enfin elles sont buttées en août, ce modelé persistant en début d'année suivante. L'engrais est apporté en deux fois : 100 kg.ha⁻¹ de NPK (14-23-14) au premier sarclage et 50 kg ha⁻¹ d'urée (46%N) 40 jours après les semis. Le dispositif est protégé du feu et du pâturage excepté en 1999 où les résidus de *Andropogon gayanus* ont brûlé accidentellement.

2.3 Mode d'échantillonnage

Les évaluations des charges solides et de ruissellement ont été réalisées pour chaque pluie pendant les campagnes 1998 à 2001. Les analyses granulométriques et chimiques ont été réalisées par compartiment (sols charriés, suspensions, eaux filtrées). Les échantillons de charriage ont été analysés pour tous les événements de 1999 à 2001 (CULT, JAC, JAL). Les faibles échantillons de suspension de 1998 et 1999 obtenus par filtration ont été regroupés par type d'événements érosifs, selon la gravité des pertes en terre ($< 1 \text{ t.ha}^{-1}$, 1 à 10 t.ha^{-1} , $>10 \text{ t.ha}^{-1}$). Les microfiltrats, assimilés à de l'argile pure, n'ont pas été analysés, cependant leur teneur a pu être estimée en extrapolant les relations avec l'argile observées dans les filtrats. Les eaux de ruissellement et les eaux de pluie ont fait l'objet d'échantillonnage pour quelques événements répartis pendant la campagne 1999.

2.4 Analyses physico-chimiques

Les analyses chimiques (carbone, azote, phosphore totaux) sur les sols ont été réalisées au laboratoire Sol Eau Plante de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA). Le carbone a été mesuré selon la méthode Walkley-Black, l'azote par la méthode Kjeldhal, le P assimilable par la méthode Bray1. L'analyse des eaux filtrées (NO_3^- , NH_4^+ , P soluble) a été faite au laboratoire Sol et Eau du CIRAD. Les mesures de la biomasse microbienne (méthode de fumigation extraction) ont été réalisées au laboratoire de biopédologie de l'IRD Dakar sur les sols charriés seulement. Les analyses physiques ont été réalisées *in situ* pour la densité apparente ; l'infiltrabilité sous lame d'eau a été mesurée au double anneau (1m^2 d'anneau central).

3. Résultats

3.1 Ruissellement et érosion, approche quantitative (répartition et cumul)

Le tableau 1 présente les données cumulées du ruissellement et de l'érosion pour chaque parcelle pendant la période expérimentale de 1998 à 2001.

3.1.1.Effet année

Les années 1998, 2000 et 2001 sont caractérisées par une pluviométrie moyenne de 680 à 850mm. L'intensité pluviométrique a été faible dans l'ensemble (généralement deux pluies d'intensité maximum $\text{I}_{30\text{mn}} > 60 \text{ mm.h}^{-1}$, 5 à 6 pluies d'intensité comprise entre 40 et 50 mm.h^{-1}). Ces campagnes assez sèches ont enregistré de faibles ruissellements et érosions. En revanche, en année décennale (1999), 5 pluies d'intensité maximale $\text{I}_{30\text{mn}}$ variant de 43 à 93 mm.h^{-1} (dont deux pluies de 80 et 93 mm.h^{-1}) ont provoqué 90 à 97% de l'érosion et 60 à 75% du ruissellement. Ces fortes intensités coïncident aussi à des sols très humides, et pour certains événements, les sols étaient engorgés.

3.1.2.Effet traitement

JAC et JAL : l'érosion est quasi nulle dans les jachères herbeuse (JAC) ou arbustive (JAL) mais le ruissellement est de 18% en année très pluvieuse ; JAL, qui porte pourtant une litière de feuilles ruisselle plus que JAC car il est situé sur un sol moins filtrant.

CULT: le ruissellement et l'érosion sont 5 à 10 fois plus élevés qu'en jachère. En année décennale l'érosion y est très importante (36,7t/ha)

CULTAG : la surface d'herbe pérenne (1/5 à 1/10 de la surface) absorbe le ruissellement issu de la culture et retient toute l'érosion en année moyenne. Il les diminue de moitié en année très pluvieuse (un brûlis accidentel en saison sèche 1999 a réduit l'effet d'absorption) ;

Figure 1 : Pluviosité, ruissellement et érosion mesurés sur les parcelles du site expérimental de Bondoukui pendant les campagnes 1998 à 2001

Années	Parcelles	Pluviosité (mm)	Lame ruissellée mm	Coefficient de ruissellement (%)	Charriage (t.ha ⁻¹)	Charges en suspension (t.ha ⁻¹)	Argile Dispersée (t.h ⁻¹)	Erosion totale t.ha ⁻¹
1998	CULT	846	169	20	0,9	3,4	non mesuré	4,3
	CULTAG	846	14	2	0,1	0,1	nm	0,2
	JAC	846	1	0	0	0	nm	0
	JAL	899	118	13	0,6	0,8	nm	1,4
1999	CULT	1155	434	38	6,2	30,6	nm	36,7
	CULTAG	1155	257	22	0,7	8,3	nm	8,9
	(Ag brûlé).							
	JAL	1098	194	18	0,4	5,1	nm	5,5
2000	CULT	800	189	24	1,5	8,3	0.12	10,0
	CULTAG	800	29	4	0,0	0,75	0	0,75
	JAC	800	18	2	0,15	0	0	0,15
	JAL	666	14	2	0	0	0	0
2001	CULT	680	175	26	4,0	11,2	nm	15,3
	CULTAG	680	53	8	0,05	0,5	nm	0,55
	JAC	680	17	2	0	0	nm	0
	JAL	652	14	2	0	0	nm	0

Tableau 1 : Bilan du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles expérimentales

3.2 Erosion, approche qualitative

3.2.1. Caractères physico-chimiques de l'horizon superficiel.

Tableau 2 : Résultats moyens des analyses et mesures in situ effectuées dans les parcs d'essais, sur l'horizon 0-10cm

d'essais, sur horizon 0-10cm																	
	argile	lf	lg	sf	Sg et eg	densité appa- rente	Porosité Totale	taux agrégats stables	infiltration C au double anneau, à régime constant	N	C / N	pHeau	pHKcl	Ptotal	Passi- milibale (Bray1)	CEC	
horizon 0-10cm	%	%	%	%	%	%	%	%	mm.h ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹			mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹	Meq/100g	
Parc 1 (jachère arborescente)	3	8,6	20,9	31,5	36	1,58	40,1	7,5	100	6,6	0,6	11	6,51	5,34	107	7	5
Parc 2 (cultures et jachères herbacées)	5,9	3,8	17	39,5	33,8	1,58	39	4,9	200	2,3	0,3	8	5,78	4,85	72	9	2

Le tab. 2 montre que les deux terrains d'essai ont des compositions physiques peu différentes mais des comportements hydriques (infiltration) distincts. Bien que mieux protégé par la litière, plus riche en MOS et mieux agrégé, le sol de la jachère arbustive infiltre deux fois moins bien que le sol des cultures. Les sols des deux sites sont en fait légèrement différents. L'hydromorphie est plus profonde dans la parcelle cultivée (80cm) que dans la jachère (pseudogley à 35cm). Le rapport Lf/argile est plus important dans la jachère arbustive.

Le ruissellement du site 2 est plus déterminé par des phénomènes d'engorgement (en 1999 notamment) que sur le site 1, surtout lié aux états de surface.

3. 2.2. Charge solide grossière « charriés » (piégeage dans la fosse de décantation)

Les teneurs en C,N et P de la charge charriée (3 à 4 gC.kg⁻¹; 0.19 à 0.30 gN.kg⁻¹; 70 à 118 mgPtotal.kg⁻¹) sont faibles et proches de celles mesurées sur l'horizon 0-10 cm (tab.2). Le rapport C/N variant de 12 à 16, il est plus élevé que celui du sol, suggérant que le charriage contient une forte proportion de résidus organiques frais issus de la litière.

Les teneurs en MOS s'accroissent en début de saison des pluies, et plus particulièrement après labour. Quelques cas de fortes charges en P et MOS correspondent à des milieux ameublés en cours de saison (battage), occasionnant une mobilisation facilitée d'éléments fins, les faibles ruissellements maintenant cette érosion concentrée. (fig 1)

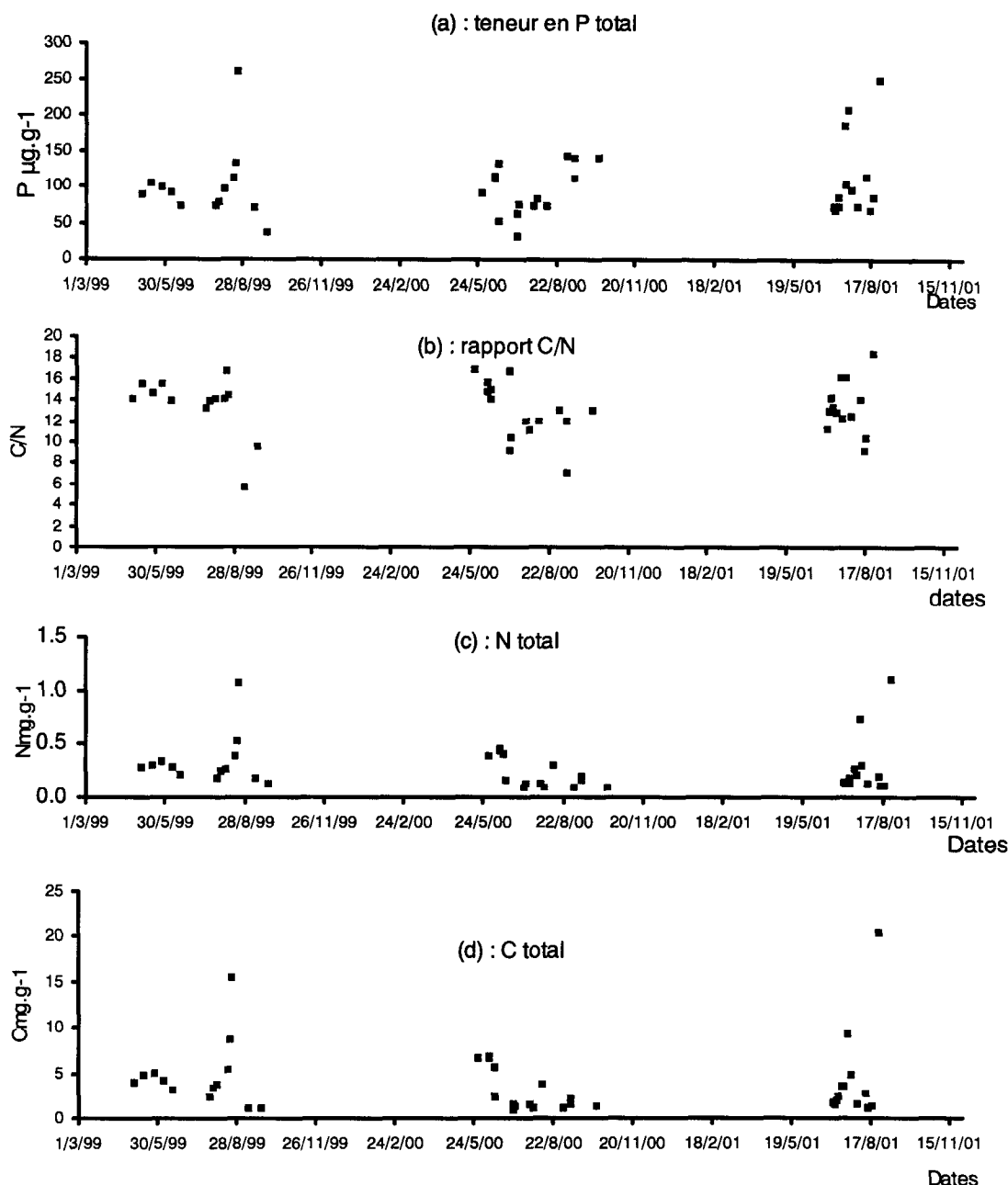


Figure 1 : Teneurs en C N P totaux et rapport C/N des sols charriés de la parcelle cultivée (CULT) pendant les campagnes 1999 à 2001

3.2.3 Charge en suspension

Les particules solides

Les charges solides en suspension dans les eaux de ruissellement sont récupérées par filtration (papier filtre). Les teneurs en C, N, P y sont dix fois plus importantes que dans les horizons 0-10 cm des sols en place (figure 3). Elles sont particulièrement constituées d'éléments fins (argiles, limons fins) qui représentent 76% lors des petits événements ($\text{ero1} < 1 \text{ t.ha}^{-1}$ de pertes en terre), 94% dans le cas des événements moyens ($1 < \text{ero2} < 10 \text{ t.ha}^{-1}$). 63% des charges solides lors des événements érosifs importants ($\text{ero3} > 10 \text{ t.ha}^{-1}$).

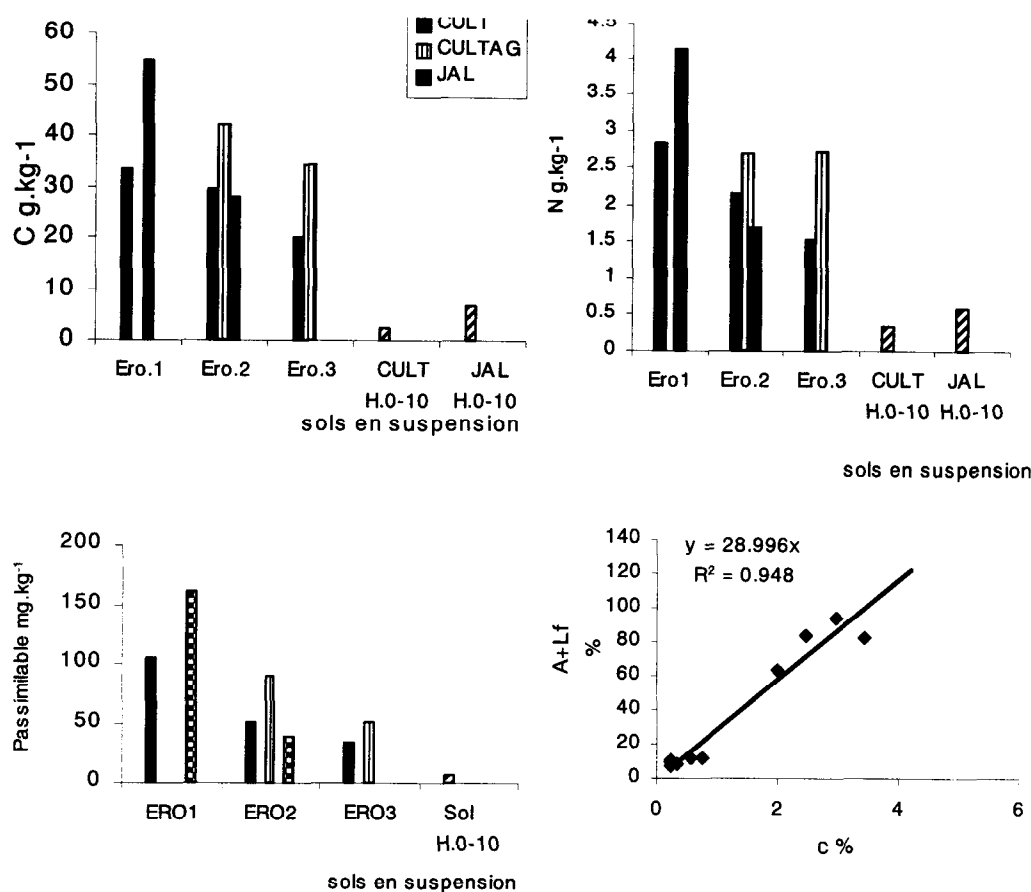


Figure 2 : Teneur en Pass, C et N des sols en suspension : teneurs en carbone (a), azote (b) et phosphore assimilable (c) regroupées en classe d'évènements érosifs Ero1 (érosion $< 1\text{t.ha}^{-1}$), Ero2 ($1\text{t.ha}^{-1} < \text{érosion} < 10\text{t.ha}^{-1}$), Ero3 (érosion $> 10\text{t.ha}^{-1}$) et relation entre les éléments fins et le carbone total (d) dans la charge solide en tenant compte de l'horizon de surface 0-10 cm

Argile colloïdale

Bien que faible ($0,1\text{t/ha}$ en 2000 sur la parcelle CULT), cette argile, isolée par microfiltration doit être prise en compte dans un bilan. Non seulement les éléments fins sont rares dans les sols, mais à l'argile est associée la matière organique. Dans les filtrats des suspensions solides, il existe une relation proportionnelle entre taux d'argile et taux de carbone : $C\% = 0,091 A\%$ ($r^2 = 0.97$). On peut exploiter cette relation pour estimer le taux de carbone de la suspension à 91gC.kg^{-1} .

Eléments minéraux dissous dans les eaux de ruissellement

Les eaux de ruissellement filtrées puis microfiltrées contiennent des éléments minéraux dissous dont les teneurs varient au cours de la saison (figure 3). Les ruissellement de début de saison sont les plus concentrées en nitrates ($6,5\text{ mg.l}^{-1}$) et en P soluble ($2,9\text{ mg.l}^{-1}$). Les ruissellements qui se produisent après le labour en juin sont plus concentrés en ammonium ($1,04\text{ mg.l}^{-1}$). Ceux qui interviennent après le sarclage avec apport d'urée en août sont plus concentrés en nitrates ($4,44\text{ mg.l}^{-1}$). Dans la plupart des autres cas, les teneurs sont identiques à la concentration dans les eaux de pluie voire plus faibles en certains cas. Les teneurs moyennes des eaux de pluie mesurées sur 7 pluies réparties sur l'ensemble de la campagne 1999 sont de 0.218 mg.l^{-1} (± 0.089) en NO_3^- , 0.122 mg.l^{-1} (± 0.089) en NH_4^+ , 0.014 mg.l^{-1} (± 0.005) en P soluble.

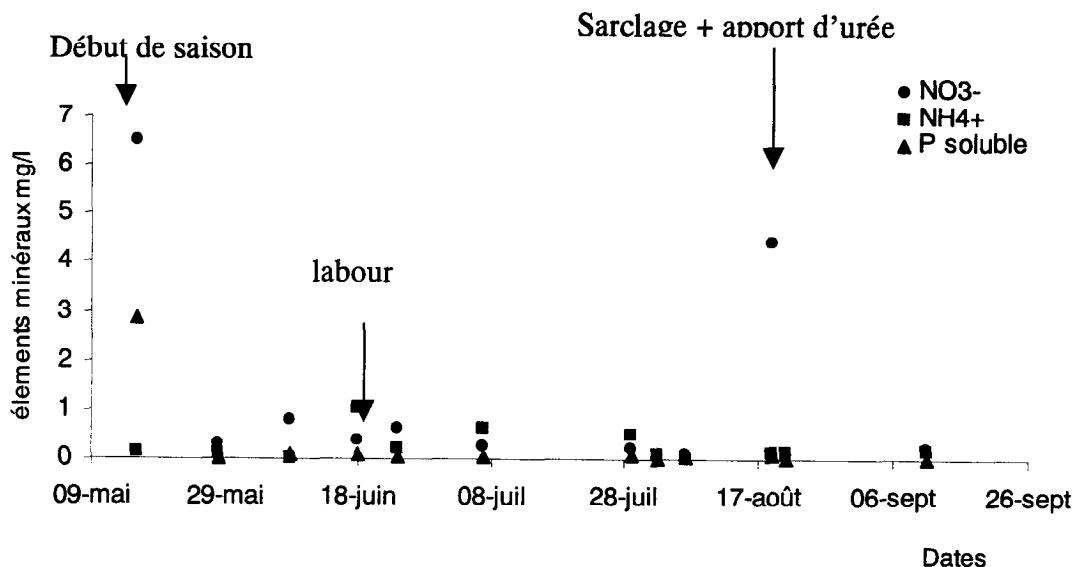


Figure 3: Teneurs en nitrates, en ammonium et en phosphore soluble des eaux de ruissellement microfiltrées sur le site expérimental de Bondoukui pendant la saison 1999 sur la parcelle CULT

3.2.4 Charge biologique

Elle n'a pu être mesurée que sur les sols charriés. La teneur en biomasse microbienne des terres charriées est 3 à 4 fois plus importante en début de saison des pluies. Les teneurs varient de 120 $\mu\text{g.g}^{-1}$ en début de campagne à 20 $\mu\text{g.g}^{-1}$ en fin de campagne (fig 4)..

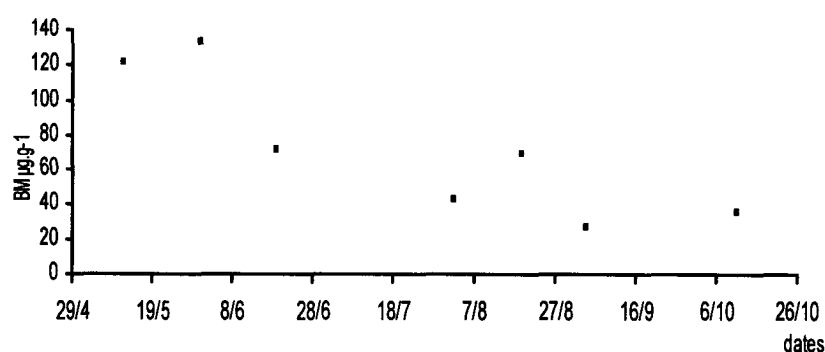


Figure 4: Biomasse microbienne des terres de fond érodées de la parcelle cultivée (CULT) au cours de la campagne 2000

3.3. Bilan de matières organiques et éléments minéraux transportés

Les déplacements de carbone organique et d'éléments minéraux suivent la même allure que les sols déplacés. Les sols en suspension, essentiellement constitués d'éléments fins, présentant des teneurs en carbone et éléments minéraux plus importantes, contribuent beaucoup aux pertes de matières fertilisantes (tab.2). Notons que les pertes par charriages peuvent être moindres que les pertes en suspension, d'où l'intérêt à accorder aux contenus des eaux filtrées. Les déplacements sont majeurs en années décennales humides (1999). Le carbone et l'azote exportés ont été respectivement 2 à 5 fois plus importants en 1999 qu'en année normale sur la parcelle CULT. La capacité d'absorption de la jachère dans la parcelle CULTAG est dépassée. La bande enherbée réduit cependant les pertes de moitié.

Tableau 2 : Déplacement de carbone, d'éléments minéraux et de biomasse microbienne par l'érosion pendant les campagnes 1998 à 2001 sur le site expérimental de Bondoukui

Années	Parcelles	C charriage kg.ha ⁻¹	C suspension kg.ha ⁻¹	C Dispersé kg.ha ⁻¹	C Total kg.ha ⁻¹	Argile t.ha ⁻¹	Lim.fins t.ha ⁻¹	CEC Équiv. ha ⁻¹ (S/CEC=75%)	N kg.ha ⁻¹	Pass. g.ha ⁻¹
1998	CULT	3	105	n.m	108	1.1	1,4	560	8,4	270
	CULTAG	0	4	n.m	4	0,04	0,04	18	0,3	11
	JAC	0	0	n.m	0	0	0	0	0	0
	JAL	2.5	44	n.m	46.5	0,03	0,02	11	3,5	130
1999	CULT	11	760	n.m	771	7,2	10,1	4280	58	1412
	CULTAG	1,8	346	n.m	348	2,5	4,1	1380	22,1	750
	JAC	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
	JAL	1,6	157	n.m	159	1,5	2,44	840	10,1	271
2000	CULT	4,8	254	10.8	270	2,9	3,9	1480	20,6	569
	CULTAG	0	25	0	25	0,3	0,3	128	2,1	78
	JAC	1	0	0	1	0	0	5	0,1	1
	JAL	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
2001	CULT	8,4	342	n.m	350	3,5	5,2	1925	27	727
	CULTAG	0,1	16	n.m	16	0,2	0,2	85	1,4	51
	JAC	0	0,2	n.m	0,2	0	0	0.8	0	0,5
	JAL	0	0	n.m	0	0	0	0	0	0

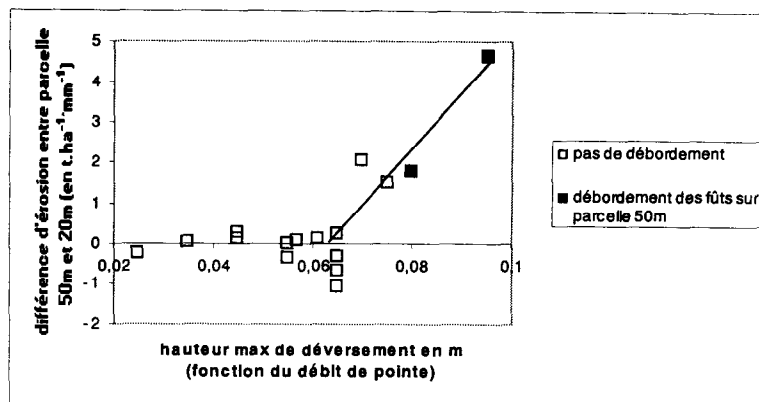
4. Discussion

4.1. Validation des données expérimentales sur l'érosion

Sur sol cultivé de façon prolongée, nous avons trouvé une érosion élevée (4 à 15 t.ha⁻¹ en année normale, 37 t.ha⁻¹ en année décennale humide sur 50m, 26t.ha⁻¹ sur 20m). Les résultats en année décennale sont compatibles avec ceux de Roose (1993) sur sols ferrugineux tropicaux cultivés de pente 0.7% (Burkina Faso Saria, 830 mm) qui présentent des érosions variant de 3 à 20 t.ha⁻¹ an⁻¹, pour des mesures sur parcelles de 20m.

On peut s'étonner de la grande différence d'érosion entre les parcelles de 50m et 20m alors que les ruissellements cumulés se valent (464mm sur 20m, 434mm sur 50m). On pourrait penser que cette différence tient à un phénomène de concentration relative par décantation du fut débordé de la parcelle 50m. En réalité, plusieurs différences se sont aussi produites entre niveaux d'érosion alors que les fûts n'avaient pas débordé (fig 5). On peut donc négliger le phénomène d'enrichissement relatif des fûts en cas de débordement. La comparaison du ruissellement et de l'érosion sur parcelle de 20m et 50m montre que la différence entre les deux parcelles devient positive lorsque le débit de pointe dépasse une certaine valeur, puis augmente en fonction du débit de pointe(fig 5).

Figure 5 : Différence d'érosion entre une parcelle cultivée de 50m et de 20m, en fonction du débit de pointe.



Cet effet « longueur de pente » est à relier à l'érosion linéaire due à la canalisation des eaux dans l'interbillon et à leur débit de pointe élevé. Le seuil observé est le seuil de compétence au-delà duquel une érosion linéaire s'ajoute à l'érosion pluviale. La teneur en éléments fins de la charge solide diminue lors de ces événements à érosion linéaire active.

On peut en conclure que les mesures d'érosion sont cohérentes et que l'importance de l'érosion 1999 sur parcelles de 50m est due à plusieurs facteurs : le caractère décennal des deux événements érosifs (forte pluie, fortes intensités, ruissellements hortonien augmentés de ruissellements d'engorgement), d'une part ; d'autre part la longueur de pente et le modelé billonné qui produit une érosion linéaire en cas de fort débit.

4.2. Composition physique des sols érodés.

Les sols érodés sont constitués de quatre principales classes granulométriques : le charriage, les charges en suspension, les charges colloïdales, la charge ionique. Le charriage représente les sols érodés grossiers (sables et agrégats) qui progressent par saltation et se redéposent dans les anfractuosités ou sur les zones d'épaississement des nappes de ruissellement en cas de réduction de la vitesse et d'étalement du ruissellement. Cette érosion qui représente environ 1/5 des pertes est mesurée comme « perte en terre » mais n'en est pas vraiment une : au mieux, elle se redépose près de la zone de départ, au pire, il s'agit seulement de départ de terre ou sables lavés, de composition proche de celle de l'horizon de surface. Cette faible distance parcourue par les éléments grossiers explique sans doute la rareté de « cônes de déjections » dans les paysages actuels et donc l'impression de faible érosion notée par les observateurs. Il en est autrement des charges en suspension qui représentent une plus forte proportion de l'érosion et sont constituées d'éléments fins (argile et limon, riches en matières organiques et nutriments liés). Ils sont susceptibles d'une exportation et d'une sédimentation lointaine, sur les bas-fonds et zones d'épandages de crues qui ne sont en général pas cultivés du fait du risque d'inondation. Cette érosion sélective est particulièrement dommageable car elle conduit à appauvrir le sol.

La sélectivité de cette érosion pluviale en zones de savane a été souvent observée (Lal, 1983 ; Roose, 1994). Mais comment expliquer le caractère constant de l'érosion des éléments fins ? On pourrait penser qu'une fois la fine couche de surface appauvrie par l'érosion pluviale, le « mulch » squelettique relictuel serait susceptible de protéger le sol. Sur sol nu et lisse, ce mulch est balayé au fur et à mesure et s'entasse en amont de petits obstacles. Aussi l'érosion pluviale n'y diminue pas avec le temps mais reste faible, le sol étant durci vu l'absence de faune. Dans les jachères, un tapis d'herbacées même lâche suffit apparemment à fixer ce mulch sableux, produisant un état de surface à micro-horizons triés dit ST3 (sables grossiers

en surface, sables fins, pellicule, Casenave et Valentin, 1989). L'érosion des fines est alors réduite et limitée aux remontées d'éléments fins par la faune et aux zones découvertes. Dans les cultures, il faut compter avec le travail du sol (labour, 2 ou 3 sarclages, buttage) et les remontées d'éléments fins de la faune (tunnels de termites en saison sèche) qui ramènent de la terre « neuve » en surface. Ceci produit de fortes augmentations de charge solide en cas de pluie érosive pendant la phase où le sol est à l'état fragmentaire, et maintient constant l'érosion des fines d'années en années, appauvrissant progressivement l'horizon de surface.

4.3. Effet « jachères »

La jachère, quelle soit naturelle (herbacées annuelles) ou « améliorée » (par semis d'herbacées pérennes *Andropogon gayanus*, Serpantié et Djimadoun, 1999), annule l'érosion en année normale et la réduit d'un facteur 10 vis-à-vis un milieu cultivé. Nous confirmons ainsi les résultats de Roose (1993). Ces effets des jachères s'accroissent au cours de la saison en relation directe avec l'installation et la croissance du tapis herbacé (Diallo et al., 2000).

Même en année décennale humide, et bien que brûlée accidentellement, la jachère à *Andropogon gayanus* constituant un cinquième seulement de la parcelle CULTAG a aussi joué un rôle d'absorption des eaux de ruissellement en provenance de la partie cultivée. Elle a réduit la lame ruisselée de 40%, annulé le charriage et surtout réduit l'érosion fine de 75%. Nous confirmons ici les premiers résultats obtenus par Fournier et al., 2000. Placée sur le chemin du ruissellement, la jachère a constitué un obstacle réduisant la vitesse de la nappe de ruissellement, augmentant l'épaisseur de la lame d'eau qui peut alors s'infiltrer rapidement sur des macropores sous-exploités pour l'infiltration de la pluie (en particulier ceux, en relief liés aux touffes, Planchon, 1990) favorisant de ce fait l'infiltration de la nappe ruisselante et le dépôt et l'injection dans le sol des sédiments transportés en suspension. Le mulch de résidus et le couvert herbacé assurent la protection du sol. Pour vérifier l'hypothèse que le couvert d'*Andropogon*+paillis de ses résidus favorisent l'infiltration d'une nappe d'eau, nous avons mesuré la vitesse d'infiltration d'une lame d'eau sous couvert d'*Andropogon gayanus* sur ce type de sol et comparé avec un sol cultivé. Le résultat fut de 500 à 800 mm.h⁻¹ pendant les trente premières minutes, contre 200mm.h⁻¹ sur état cultivé. Il n'y avait pas de pores de mésofaune débouchant en surface, ce qui accrédite l'idée que c'est le renouvellement de l'enracinement (racines épaisses) des touffes pérennes qui crée la macroporosité; et le mulch de pailles protège l'état de surface (et étale la lame d'eau). Dans notre expérimentation, cet effet d'absorption est optimal car le sol de l'essai est filtrant dans son épaisseur (hydromorphie profonde, couleur rougeâtre) mais s'encroûte facilement et se tasse au niveau du fond de labour. En 1999, avec le brûlis accidentel du couvert herbacé et du mulch, et la mortalité de quelques touffes, enfin le caractère des ruissellements lié à l'engorgement, cet effet d'absorption n'était pas à son optimum.

4.4. Composition chimique des sols érodés

Les teneurs de carbone et en nutriments sont importantes dans les sols en suspension où elles représentent plus de 10 fois la concentration initiale de l'horizon 0-10 cm. Le carbone et les éléments minéraux déplacés suivent la même allure que l'érosion en suspension. Les teneurs en carbone, en éléments minéraux et en biomasse microbienne sont plus importantes en début de campagne et après travaux du sol à cause de la disponibilité de matière organique de litière et du travail du sol qui permet l'érosion des fractions plus fines du sol auxquelles sont associés l'essentiel des nutriments. Les pluies venant sur sol travaillé entraînent peu de

ruissellement mais les charges érodées sont alors plus riches en carbone et en éléments minéraux. Les pertes de nitrates dissous liées au ruissellement se répartissent de la façon suivante : 47% après la première pluie de début de saison et 32% après les apports d'engrais minéraux (urée).

Le bilan d'érosion en terme qualitatif est encore mal connu. On accuse souvent l'érosion d'être responsable de la baisse des productions pendant les périodes de culture. Avec des départs annuels moyens de 20kg de N, 0,5kg de P assimilable, 1500 équivalents de CEC/ha (saturée aux $\frac{3}{4}$ par des bases échangeables) par hectare, qui profitent en partie aux lieux de rétention et d'absorption, comme les jachères et les pâturages d'inondation, l'érosion ordinaire n'apparaît pas comme un facteur majeur de pertes bien qu'elle contribue au bilan négatif. Ces résultats d'érosion « normale » sont comparables aux données de Quansah et Ampontuah (1999) qui comparent différents types de systèmes labourés. Il en va autrement des années décennales humides, qui accusent des pertes graves : 58 kg de N, 4280 équivalents de CEC, 1,4kg de P assimilable, qui ne profitent que partiellement aux surfaces de réception.

5. Conclusion

L'érosion sélective de l'horizon superficiel du sol plus riche en éléments minéraux et en MOS a pour conséquence un transfert de carbone et de nutriments des sols sur les pentes au détriment des parcelles cultivées et au profit de surfaces de réception absorbantes plus ou moins proches. En année normale les pertes de carbone et d'éléments minéraux sont faibles sur parcelle cultivée mais en année décennale, les transferts de carbone sont considérables, avoisinant 0,8tC/ha. Par rapport à d'autres flux, cette quantité est faible, cependant il s'agit de matière organique du sol, donc d'une matière organique « noble » compte tenu du faible rapport isohumique de conversion de la MO fraîche en MOS. Les périodes de déplacement maximum de carbone et d'éléments minéraux sont les débuts de cycle et les dates suivant le travail du sol.

Des jachères herbeuses, arbustives ou à *Andropogon gayanus* ruissellent, mais s'érodent peu. Elles ont surtout une capacité d'absorption des eaux de ruissellement d'autant plus élevée que le sol a la propriété de s'encroûter mais d'être très filtrant dans son épaisseur, ce qui est fréquemment observé y compris en bas de pente sur sols sableux ferrugineux lessivés hydromorphes en profondeur. Les charges en suspension se déposent alors ou sont « injectées » dans le sol et contribuent à améliorer le statut organique et minéral des sols de ces jachères de façon non négligeable, mais essentiellement en bas de pente. Cependant en année de fortes pluies, ou lorsque le couvert et le paillis brûlent, l'effet d'absorption par une zone enherbée peut être fortement atténué. Ce processus de redistribution de la fertilité et de création d'une hétérogénéité par l'érosion et la resédimentation a été encore peu décrit.

Nous avons confirmé ainsi l'hypothèse de Fournier et *al.* (2000), selon laquelle la charge solide riche en fertilisants issue d'un champ pouvait être sédimentée à proximité des zones d'érosion en associant aux cultures des aires de jachères peu pâturées en saison humide. Ceci pourrait généraliser les observations classiquement effectuées sur « bandes herbeuses » (Boli et al, 1996). Les pertes de matière organique et de nutriments à grande distance seraient donc effectivement limitables par une répartition adéquate des jachères ou de prairies artificielles au sein du champ cultivé ou du versant. La prise en compte des années les plus humides, qui sont aussi les plus érosives, exige cependant des surfaces supérieures aux rapports de surface (1/5) que nous avons testés, ou la combinaison de « jachères d'absorption » avec des mesures

de recouvrement classiques (plantes de couvertures associées, telles que niébé, arachide, Mucuna, Cucurbitacées etc), réduction du travail du sol par l'emploi des herbicides, aménagements en dur (cordons pierreux). Il faudra cependant essayer d'apprécier les conséquences de fortes infiltrations sur l'évolution chimique du sol.

Bibliographie

BOLI (Z.), ROOSE (E.), BEP-AZIEM (B.), SANON (K.), WAECHTER (F.), 1996. Effet des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux et recherche de système de cultures intensifs et durables en région soudanienne du nord Cameroun.

Cah. ORSTOM sér. Pédol., 28, 2 : 309-326.

CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, 1989. 229 p.

DIALLO (D.), ORANGE (D.), ROOSE (E.), MOREL (A.), 2000. Potentiel de production de sédiments dans le bassin versant de Djitiko (103 km²) Zone soudanienne du Mali sud. Bull. Réseau Erosion 20 :54-66.

FOURNIER (J.), SERPANTIE (G.), DELHOUME J. -P., GATHELIER (R.), 2000. – Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina Faso. Application à l'aménagement des versants. In FLORET et P. ONTANIER (ed., 2000-a) : vol. I, pp. 179-188.

JUO (A. S. R.), FRANZ. LUEBBERS (K.), DABIRI (A.) & IKHILE (B.), 1995 Changes in soil properties during long-term fallow and continuous cultivation after forest clearing in Nigeria, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. LVI, n° 1 : pp. 9-18.

LAL (R.), 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. Techn. Bull. n°1, IITA,Ibadan, 38p.

MAASS (J.M.), JORDAN (C.F.), SARUKHAN (J.), 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. J. Appl. Ecol. 25, 595-607.

PIERI (C.), 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara. Min. Coop. et Dév., CIRAD paris, 444 p.

PLANCHON (O.), JEANNEAU (J.L.), 1990. Le fonctionnement hydrodynamique à l'échelle du versant. Dans Collectif Hyperbav (1990) pp165-183.

PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEYNI-BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1986. Apport de l'infiltromètre à aspersion pour l'évaluation des ressources en sol des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Col. et Séminaires, pp 165-189.

ROOSE (E.), BERTRAND (R.), 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. *Agron. Trop.* 26(11) : 1270-1283.

ROOSE (E.), 1980. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct.ès Sciences, Université d'Orléans, 587 p. In : *Travaux et documents* de l'ORSTOM, Paris, 130, 569 p.

ROOSE (E.), 1993. Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. In Floret et Serpantié (éd., 1993) : pp. 223-244.

ROOSE (E.), 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (CGES). *Bulletin Pédologique de la FAO* n°70, 420p.

SERPANTIE (G.), MADIBAYE (D.),1999. Recherches participatives sur la culture De *Andropogon gayanus Kunth* var *tridentatus* Hack en zone soudanienne II. Essais participatifs d'installation de peuplements (Bondoukui et Bereba, Burkina Faso). In Actes de l'atelier régional sur les cultures fourragères, Korhogo 26-29mai 1997: 191-204.

WISCHMEIER W.H., MANNERING J.V., 1969. Relation of soil properties to soil erodibility. Soil Science society of America 33 :131-137.

WISCHMEIER W.H.,1974. New developments in estimating water erosion. 29e Meeting Soil Cons. Soc. Amer. Syracuse, New York. pp. 179-186.

Remerciements :

Une recherche collaborative entre trois instituts est à la base de ce travail :

- l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)
- l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
- l'Ecole inter-états des Techniciens de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural (ETSHER) à travers le projet D.S.O. Etsher n°BF 002702) sur financement des Pays Bas