

Influence des pratiques culturales et du type de sols sur les stocks et pertes de carbone par érosion en zone soudanienne du Mali

Diallo Drissa¹, Didier Orange², Eric Roose³

¹ Lab. Agropédologie, IPR de Katibougou, BP 6, Koulikoro, Mali. Courriel : drdiallo@ird.ml

² IRD, UR ECU, 57 Tran Hung Dao, Hanoi, Vietnam. Courriel : orange@ird.fr

³ IRD, Lab. Most, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France. Courriel : roose@mpl.ird.fr

Résumé

Au cours des années 1960-1970, les mesures d'érosion sur parcelles (de 100 à 500 m²) ont montré que les pertes en terre dans les zones agricoles soudanienne d'Afrique occidentale peuvent être plus ou moins importantes selon les modes d'utilisation des terres. Ces dernières connaissent actuellement au Mali de sérieux bouleversements dont l'intensification de la culture du coton/maïs, la diminution de la durée de la jachère et le développement de l'élevage. Les conséquences sur le fonctionnement des sols sont complexes et méritent d'être étudiées en regard des pratiques agricoles. Pour la première fois en zone mandingue, les stocks et flux de carbone du sol ont été mesurés au cours des saisons pluvieuses 1998 et 1999 en fonction du ruissellement et de l'érosion hydrique afin de déterminer l'influence du type de sol, de la longueur du temps de jachère et de deux techniques culturales (le labour conventionnel et le travail sur la ligne du sol, ou encore *travail minimum du sol*). Dans la couche supérieure du sol (0-10cm), le stock de carbone atteint 40 t ha⁻¹ dans le sol brun vertique alors qu'il est toujours inférieur à 15 t ha⁻¹ dans les sols ferrugineux tropicaux. Quel que soit le type de sol, le stock de carbone est du même ordre de grandeur sous jachère et sur parcelle de travail minimum du sol (conduite pendant 3 ans), mais nettement plus faible sous labour. Le coefficient de ruissellement est plus faible sur sol brun vertique quelle que soit l'occupation du sol (en moyenne 27 % contre 34 % sur sol ferrugineux tropical). Quel que soit le type de sol, la jachère ruisselle en moyenne 22 % contre 39 % sur parcelle nue, 36 % sous culture avec labour et 25 % sous culture avec travail minimum du sol. L'érosion sur sol brun vertique est plus faible sous jachère et sous culture avec travail minimum du sol : respectivement 1,7 t ha⁻¹ an⁻¹ et 6 t ha⁻¹ an⁻¹ contre 4,8 t ha⁻¹ an⁻¹ et 7,4 t ha⁻¹ an⁻¹ pour le sol ferrugineux. En conditions défavorables (sol nu et labour), les comportements des deux types de sols étudiés sont très nuancés. Au cours des deux années de mesure, la perte moyenne de carbone par ruissellement et érosion sur sol ferrugineux tropical a atteint respectivement 146, 395 et 184 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour la jachère, le labour et le travail minimum du sol. Les pertes sur sol brun vertique sont du même ordre de grandeur sous jachère (181 kg ha⁻¹ an⁻¹), fortement inférieures sous labour (215 kg ha⁻¹ an⁻¹) et fortement supérieures sous travail minimum du sol (283 kg ha⁻¹ an⁻¹). Enfin, nos mesures soulignent que la perte de carbone du sol se fait principalement sous forme particulaire quelles que soient les conditions pluviométriques contrastées de notre étude (78 à 90 % de la perte totale). Ces pertes par érosion ont lieu principalement lors des grandes averses qui provoquent des écoulements concentrés en rigoles et ravines : elles expliquent partiellement les différences de stock de carbone liées à l'usage des terres.

Mots clés : Mali, Zone soudanienne, Sol brun vertique, Sol ferrugineux tropical, Couvert végétal, Techniques culturales, Ruissellement, Erosion, Carbone érodé, Carbone stocké

1. Introduction

Les mesures d'érosion sur parcelles ou champs paysans (de 100 à 500 m²), commencées dans les zones agricoles soudanaises d'Afrique occidentale au cours des années 1960-1970, ont montré que les pertes en terre peuvent être plus ou moins importantes selon les modes d'utilisation des terres (Fauck, 1956 ; Fournier, 1967 ; Roose, 1967, 1981 ; CTFT, 1979 ; Birot, 1981 ; Neboit, 1983 ; Mietton, 1988)

En zone soudanienne du Mali d'importants bouleversements ont été observés dans les modes de gestion des terres à partir des années 1980 : la diminution de la durée de la jachère, l'intensification des cultures industrielles et la surexploitation pastorale des parcours sont notées parmi ces changements (Karembé *et al.*, 2000).

Pour la première fois au Mali Sud, l'influence des pratiques culturales (le labour conventionnel et le travail minimum du sol) et du type de sols ont été mesurés sur parcelles d'érosion au cours des saisons pluvieuses 1998 et 1999, sur cultures de maïs et coton et sur jachère longue. L'érosion a pu être calculée par la mesure des pertes en terre et du ruissellement. Par ailleurs, le carbone organique étant un élément clé de la valorisation durable des sols, les pertes de carbone dissous et particulaires liées à l'érosion ont été mesurées. En effet, la connaissance de la dynamique de cet élément peut être très utile pour l'amélioration ou la restauration des écosystèmes cultivés. Au cours de l'érosion, les nutriments et le carbone organique du sol sont redistribués à travers le paysage et une partie de ces éléments est transférée dans les écosystèmes aquatiques (Lal, 1995 ; Stalland 1998 ; Starr *et al.*, 2000), où ils contribuent au processus d'eutrophisation des eaux de surface et aux émissions de gaz à effet de serre (Feller et Beare, 1997 ; Orange *et al.*, 2002). Notre étude concerne donc à la fois les problèmes de développement durable de l'agriculture en milieu soudanais et ceux de la séquestration du carbone à l'échelle globale.

2. Milieu d'étude

L'étude a été conduite dans le terroir du village de Ouronina (commune de Bancoumana), dans le bassin versant de Djitiko (12° 03 N., 8° 22 O). Il est situé en zone climatique soudanienne dans le haut bassin du Niger au Sud Mali. Le régime pluviométrique est de type monomodal avec le maximum mensuel de pluies en août. Au cours des deux campagnes expérimentales (1998 et 1999), la pluviométrie a été respectivement de 995 mm et de 1355 mm (mesurée par un pluviomètre au niveau des parcelles d'érosion). Ces valeurs se situent de part et d'autre de la moyenne interannuelle (1076 mm) mesurée à Kangaba (sur la période 1939-1995), station climatique de référence située à 20 km. Les observations ont donc eu lieu une année légèrement déficitaire (en 1998) et une année fortement excédentaire (en 1999).

Le substratum géologique est formé du socle précambrien (constitué de granite et schiste), couvert par des altérites et des alluvions atteignant 15 à 35 m d'épaisseur. Les parcelles d'érosion sont placées d'une part sur un sol brun vertique et, d'autre part, sur un sol ferrugineux tropical rouge. Ces deux types de sols ont été choisis du fait de leur importance dans les programmes actuels d'intensification agricole au Mali. Certaines caractéristiques de ces sols sont données au tableau 1. Ils ont un taux d'argile similaire (de l'ordre de 26 %) et ils se différencient principalement par la composition du complexe absorbant : il est près de deux fois plus important sur le sol brun vertique que sur le sol rouge. Le sol brun est un sol basique à CEC élevée. Enfin, classiquement, il est situé à proximité du bas-fond, en bas de la toposéquence étudiée.

Tableau 1 : Caractéristiques d'un profil représentatif du sol brun vertique (SB) et du sol rouge ferrugineux (SR) des sites expérimentaux (prélevés à l'automne 1997)

Propriétés du sol	Sol brun vertique (SB)			Sol rouge ferrugineux (SR)		
	0-28	28-40	40-90	0-15	15-30	30-90
PF 2,5 (%)	47,5	30,7	33,7	34,0	33,6	31,8
PF 3 (%)	30,8	23,1	26,1	25,3	23,5	22,5
Granulométrie						
Argile (%)	26,1	23,5	29,8	25,1	30,1	34,0
Limon fin (%)	31,7	15,9	15,0	21,2	20,1	14,2
Limon grossier (%)	24,2	29,9	19,2	37,8	36,0	28,3
Sable fin (%)	11,9	13,8	24,8	13,6	11,7	20,5
Sable grossier (%)	6,0	16,9	11,3	2,3	2,2	3,0
Complexe absorbant (*)						
Ca (meq/100 g de sol)	18,5	8,7	7,7	6,9	5,2	4,1
Mg (meq/100 g de sol)	6,2	4,8	5,6	3,9	3,2	2,7
K (meq/100 g de sol)	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
CEC (meq/100 g de sol)	27,1	15,4	15,6	13,1	10,8	9,0
S(Ca, Mg, K, Na) (meq/100 g de sol)	25,1	13,6	13,5	10,8	8,5	6,9
PH (cobalt)	6,0	6,3	6,0	-	-	-

(*) Méthode cobalti hexamine.

La durée du couvert végétal est de l'ordre de 120 jours par an (Sivakumar, 1989). La végétation naturelle est une savane arborée (à *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Isoberlinia doka* et diverses combrétacées) avec un tapis graminéen très dense et essentiellement annuel. Le mode de gestion actuel de la biomasse est caractérisé par le passage annuel des feux de brousse (brûlant végétation spontanée et résidus de culture) et le surpâturage des parcours et des champs par les troupeaux de bovins. La rotation coton - maïs est encouragée par les services techniques du ministère chargé de l'agriculture. Le labour à traction bovine est le mode dominant de travail du sol en milieu cultivé : la profondeur du labour est de l'ordre de 12 cm. Nos mesures d'état de surface mettent en évidence un net contraste entre saison sèche et saison humide, et une nette différence entre jachère et milieu cultivé (Diallo, 2000). Les évolutions saisonnières d'état de couverture du sol, en fonction de l'occupation du sol et des pratiques culturales sont données au tableau 2. Il apparaît que le couvert végétal est toujours inférieur sur le sol rouge (SR), surtout en saison des pluies. Le travail minimum du sol permet d'atteindre un recouvrement quasi-total : il atteint 98 % de la surface du sol sur la parcelle SB avec le travail minimum du sol. Par contre, c'est la vieille jachère qui donne un meilleur recouvrement en fin de saison sèche : sur sol brun, 41 % contre 13 % et 21 % pour respectivement le labour et le TMS. Sur sol rouge, le recouvrement descend jusqu'à seulement 8 % avec une parcelle de labour (contre 34 % pour la parcelle de jachère).

Tableau 2 : Influence de l'occupation du sol et des pratiques agricoles sur le taux de recouvrement de la surface du sol par le couvert végétal vivant et la litière du sol (d'après Diallo, 2000)

Occupation du sol Ou pratique agricole	Sol brun vertique (SB)		Sol rouge ferrugineux tropical (SR)	
	Début de saison pluvieuse (%)	Milieu à fin de la saison pluvieuse (%)	Début de saison pluvieuse (%)	Milieu à fin de la saison pluvieuse (%)
Jachère	41	82	34	74
Labour	13	82	8	64
Travail minimum du sol	21	98	11	91

3. Méthodes

3.1 - Evaluation du stock de carbone de l'horizon superficiel

Le prélèvement de sol pour le dosage du carbone au laboratoire a porté sur les 10 premiers centimètres du sol avec trois répétitions sur chaque sol et en fonction de son occupation (jachère, culture avec la pratique du labour, culture avec le travail minimum du sol). Ces prélèvements ont été effectués en saison sèche à la fin de l'automne 1997 puis en début 2000.

3.2 - Expérimentation au champ

Les résultats expérimentaux faisant l'objet de cet article sont obtenus sur des parcelles de 100 m² où la pente est comprise entre 1 et 2 %.

a. Occupation du sol dans les parcelles

Trois occupations du sol (vieille jachère, culture de maïs puis coton avec la pratique du labour conventionnel, culture avec travail minimum du sol), choisies en fonction des pratiques locales et des objectifs d'amélioration des agrosystèmes, sont testées dans un dispositif incluant des parcelles nues travaillées et sarclées (représentant le « témoin universel »). La jachère est vieille d'au moins 20 ans. Les cultures sont installées sur des parcelles exploitées par les paysans depuis plus de 5 ans. Le labour est pratiqué, en début de saison des pluies, juste avant le semis. Par la suite, deux sarclages sont faits au cours de la saison pour protéger les cultures contre les adventices. Dans le cas de la parcelle cultivée avec travail minimum du sol, en début de saison, les adventices de 15 à 20 cm de haut sont brûlées par un herbicide total. La parcelle est ainsi couverte par une fine couche de mulch. Elle est ensuite travaillée à la pioche sur 15 cm de profondeur, uniquement sur les lignes de semis juste avant de semer les cultures. Par la suite, l'entretien des cultures est assuré en faisant deux sarclages manuels.

b. Les dispositifs de quantification du ruissellement et de l'érosion

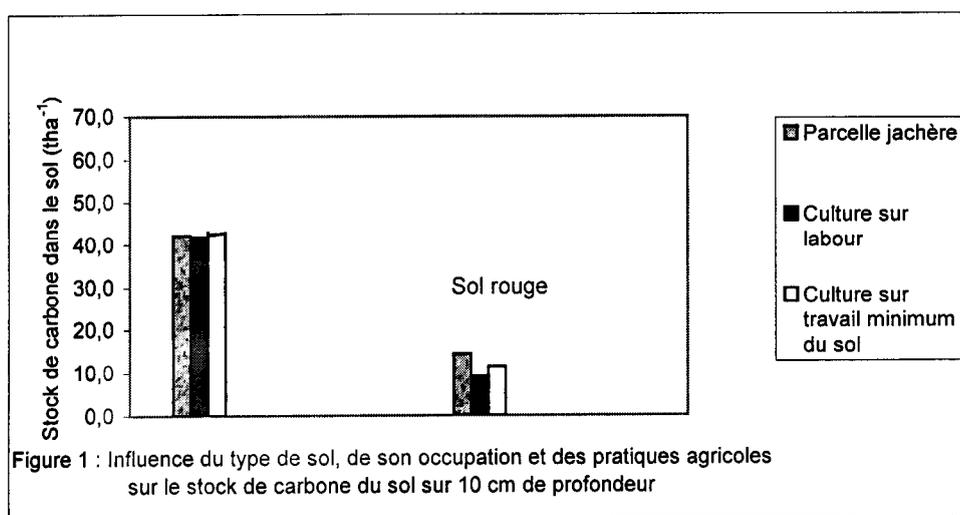
Les parcelles expérimentales (20m x 5m) ont été aménagées de façon classique (Roose, 1980 ; Diallo, 2000). Chaque parcelle est isolée au milieu d'un champ par des tôles de 25 cm de large, fichées dans le sol sur 15 cm pour éviter tout débordement du ruissellement. A l'aval, un canal réceptionne le ruissellement et les terres de fond (sables et agrégats, TF) qui circulent par charriage sont collectées dans une première cuve de sédimentation. Puis les eaux qui débordent avec les suspensions (MES) sont collectées dans

Tableau 3 : Qualité chimique de l'horizon de surface (0-10 cm) du sol brun vertique (SB) et du sol rouge ferrugineux (SR) sous différentes usages culturaux en novembre 1997 et en janvier 2000 (moyenne de 3 répétitions par prélèvement)

Propriétés du sol	Sol brun vertique (SB)						Sol rouge ferrugineux (SR)					
	Jachère		Labour		TMS	nu	Jachère		Labour		TMS	nu
	1997	2000	1997	2000	2000	2000	1997	2000	1997	2000	2000	2000
pF 2,5 (%)	49,7	-	45,1	-	-	-	26,9	-	27,7	-	-	-
pF 3 (%)	33,1	-	36,5	-	-	-	21,0	-	19,5	-	-	-
Granulométrie												
Argile (%)	27,1	20,8	25,8	27,5	20,8	20,6	35,6	24,8	20,8	14,4	13,1	14,7
Limon (%)	58,0	68,3	58,0	54,3	69,3	56,4	37,2	51,6	51,8	54,3	56,8	65,2
Sable (%)	14,9	10,9	16,2	18,2	9,9	23,0	27,2	23,6	27,4	31,3	30,1	20,6
Complexe absorbant (*)												
Ca (meq/100 g de sol)	24,1	20,7	18,4	25,0	24,1	16,2	4,5	3,5	2,8	1,6	2,3	3,3
Mg (meq/100 g de sol)	8,1	5,9	6,3	8,6	6,0	5,5	3,0	2,4	1,4	0,7	1,1	1,2
K (meq/100 g de sol)	1,1	0,7	0,8	0,6	0,9	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1
CEC (meq/100 g de sol)	35,1	26,4	27,7	35,0	31,2	20,1	8,8	6,7	5,0	3,2	3,8	4,7
S(Ca, Mg, K, Na) (meq/100 g de sol)	33,4	27,5	25,7	34,3	31,1	22,3	7,8	6,3	4,4	2,5	3,7	4,4
pH	6,6	6,4	6,8	6,5	6,6	6,1	5,6	6,2	5,0	5,7	6,5	6,2
Matière organique (mg g⁻¹)												
C (mg g ⁻¹)	-	6,61		6,55	7,04	3,94	-	1,89		1,19	1,49	1,26
N (mg g ⁻¹)	2,29	3,84		3,81	4,10	2,29	1,15	1,10		0,69	0,87	0,74
C/N	0,15	0,246		0,231	0,25	0,14	0,075	0,07		0,048	0,062	0,05
					0	5		4				
C/MO	-	0,58		0,58			-			0,58	0,58	0,59
C/N	15,3	15,6		16,5	0,58	0,58	15,3	0,58		14,4	14,0	14,5
					16,4	15,8		14,9				

(*) Méthode cobalti hexamine.

Les rapports C/N sont toujours élevés (de l'ordre de 15 à 16), ce qui désigne une matière organique relativement mal décomposée et pauvre en azote sur tout le profil.



deux cuves en béton reliées par un partiteur à tubes. A chaque pluie, sont mesurées les hauteurs de pluie (à 0,1 mm près), la lame ruisselée (à 0,05 mm près), les terres de fond (par pesée humide dans un volume constant en kg ha^{-1}) et les suspensions (turbidité en g l^{-1}). Les paramètres calculés sont le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM en % de la pluie annuelle), la pluie d'imbibition à l'état sec (Pis en mm) et à l'état humide (Pih), l'érosion totale (E en $\text{t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) qui cumule les pertes de terre sous forme de sédiments grossiers circulant par charriage (TF en $\text{t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) et les matières en suspension sous forme de sédiments fins (MES en $\text{t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$).

c. Echantillonnage des eaux et des sédiments pour le dosage du carbone organique

Après chaque pluie donnant lieu à un ruissellement, trois échantillons sont prélevés par parcelle : un échantillon d'eau de ruissellement, un échantillon de terre de fond et un échantillon des matières en suspension. Ces échantillons sont stockés au laboratoire et les terres sont séchées à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs. En fin de campagne, pour limiter le nombre d'analyses, nous avons réalisé des échantillons moyens, représentatifs des quatre périodes fonctionnelles de la campagne culturale : 1) des premières pluies à la date du labour (de mai à fin juin), 2) le mois de juillet (allant jusqu'au buttage), 3) le mois d'août, 4) de septembre jusqu'à la récolte, en novembre ou décembre.

3.3 - Dosage du carbone organique et évaluation de la perte de carbone par érosion

Le dosage du carbone organique particulaire (POC) sur les échantillons de sols, sédiments et suspension a été fait au Laboratoire commun du CIRAD (Montpellier) sur un CHN (Fisons Instrument Na 2000 N-Protein). Le dosage du carbone organique dissous (DOC) sur les échantillons d'eau de ruissellement a été réalisé au laboratoire des sols de l'IRD (Montpellier) sur un Shimadzu TOC-5000. Connaissant le volume d'eau ruisselé et les pertes en terre (TF + MES), il est possible d'évaluer la perte de carbone organique particulaire dans les sédiments et de carbone organique dissous dans les eaux de ruissellement.

4. Résultats

4.1 - Le stock de carbone organique dans le sol

Le stock de carbone dans les 10 premiers centimètres du sol est fonction du type de sol, des techniques culturales et du mode de gestion de la biomasse végétale (fig.1). Le sol brun vertique montre des stocks trois fois plus importants que ceux du sol ferrugineux tropical : $42,7 \text{ t ha}^{-1}$ contre $14,3 \text{ t ha}^{-1}$ en situation de jachère. Le stock de carbone du sol sous jachère est toujours nettement supérieur à celui noté sur parcelle cultivée en utilisant le labour conventionnel. Par contre, sur parcelle cultivée avec la technique du travail minimum du sol, le stock de carbone est du même ordre de grandeur que celui mesuré sous jachère : ceci montre l'importance du sous-étage sur l'érosion et sur l'apport de carbone au sol.

4.2 Caractéristiques du ruissellement

Les mesures faites au cours des deux campagnes (1998 et 1999), sur parcelles de 100 m² montrent que les valeurs caractéristiques du ruissellement (KRAM, Pis et Pih, des tableaux 3 et 4) diffèrent selon le type de sol et son occupation (végétation naturelle, milieu cultivé). Dans chaque cas, les caractéristiques du ruissellement sont influencées par la quantité annuelle de pluie.

Coefficient de ruissellement annuel moyen (Tableau 3)

Le coefficient de ruissellement annuel moyen est plus faible sur sol brun vertique que sur sol ferrugineux tropical et cela quelque soit la couverture végétale et les techniques culturales : en moyenne 27 % sur sol brun contre 34 % sur sol ferrugineux rouge. La parcelle de jachère ruisselle environ 2 fois moins que la parcelle nue (22 % contre 39 % en moyenne). Toutes les parcelles cultivées montrent un plus fort coefficient de ruissellement par rapport à la jachère : 36,3 % sur parcelle labourée et 25,3 % sur parcelle de travail minimum du sol. Le travail minimum du sol et le maintien de la litière entre les lignes, réduit de 30% le ruissellement des champs labourés.

Tableau 3 b: Influence du type de sol et de la gestion de la biomasse sur le ruissellement (valeurs moyennes de 1998 et 1999)

Occupation du sol et pratiques agricoles	Coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) %		
	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Moyenne
Parcelle nue	32,6	45,5	39,1
Jachère	21,6	21,9	21,8
Labour	27,4	45,2	36,3
Travail minimum du sol	25,8	24,8	25,3
Moyenne	26,9	34,4	

Pluie d'imbibition (Tableau 4)

Le sol brun vertique montre les plus fortes valeurs de pluie d'imbibition : en moyenne 21,4 mm sur sol brun contre 13,6 mm pour le sol ferrugineux à l'état sec et respectivement 10,1 et 8,5 mm à l'état humide. Le ruissellement commence donc plus tardivement sur les sols bruns et nécessite des pluies plus abondantes que sur sol ferrugineux.

Il faut noter d'autre part que la pluie d'imbibition dépend de l'occupation du sol et des pratiques culturales : à l'état sec, la pluie d'imbibition est de l'ordre de 20 mm en milieu cultivé, labouré ou pas, contre respectivement 15 mm et 14,1 mm pour la jachère (végétation naturelle) et la parcelle nue (deux surfaces couvertes de pellicules de battance lors des premières pluies) : le travail du sol augmente donc temporairement la rugosité de la surface du sol et sa capacité d'infiltration.

Tableau 4: Influence du sol et du couvert végétal sur la pluie d'imbibition

Occupation du sol et pratiques agricoles	Pluie d'imbibition à l'état sec (Pis) mm			Pluie d'imbibition à l'état humide (Pih) mm		
	Sol brun Vertique	Sol Ferrugineux Tropical	Moyenne	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Moyenne
Parcelle nue	16,2	12	14,1	8,1	6,5	7,3
Jachère	16,3	13,7	15	8,6	8,1	8,4
Labour	25,7	14,5	20,1	11,5	9,4	10,5
Travail minimum du sol	27,5	14	20,8	14	10	12
Moyenne	21,4	13,6		10,1	8,5	

4.3 Les pertes en terre (Tableau 5)

Les plus fortes érosions annuelles sont mesurées sur le sol ferrugineux tropical quelque soit le couvert végétal et les pratiques culturales. Sur les deux types de sol, l'érosion mesurée sur parcelle labourée est nettement plus importante que celles mesurées sous jachère et sur parcelle de travail minimum du sol. Il faut noter que la perte en terre varie d'une année à l'autre quelque soit le sol et son occupation (tab.6).

Tableau 5 : Influence du type de sol et du mode de gestion de la biomasse sur l'érosion annuelle

Occupation du sol et pratiques agricoles	Erosion annuelle t ha ⁻¹ an ⁻¹		
	Sol brun Vertique	Sol ferrugineux tropical	Moyenne
Parcelle nue	46,1	43,8	45,0
Jachère	1,7	4,8	3,3
Labour	14,1	21,4	17,8
Travail minimum du sol	6	7,4	6,6

Tableau 6 : Influence de la quantité annuelle de pluie sur l'érosion annuelle
(mesures sur sol ferrugineux tropical)

Occupation du sol et pratiques agricoles	Erosion totale (t ha ⁻¹ an ⁻¹)			Taux de matière en suspension (%)		
	1998	1999	Moyenne	1998	1999	Moyenne
Parcelle nue	30	57,5	43,8	11	15,5	13
Jachère vieille	4	5,6	4,8	19	28,6	24
Labour	15,8	21	18,4	12	20	16
Travail minimum du sol	2,7	12	7,4	31	13	22

NB : cultures de maïs en 1998 et de coton en 1999
: Pluie = 995 mm en 1998 et 1355 mm en 1999

4.3 Les pertes de carbone

4.3.1 Les teneurs en carbone dissout (DOC) des eaux de ruissellement

Les teneurs des eaux de ruissellement en carbone organique dissout (DOC) sont présentées aux tableaux 7 et 8. Les valeurs moyennes varient nettement d'une année à l'autre : de 1 à 4 mg l⁻¹ en 1998 et environ 10 à 13 mg l⁻¹ en 1999. L'influence des pratiques agricoles sur ces teneurs n'est pas nette. Cependant, les eaux de ruissellement issues des parcelles " travail minimum " présentent, le plus souvent, le plus faibles teneurs en carbone dissout.

Tableau 7 : Teneur des eaux de ruissellement en carbone (mg l⁻¹)
(campagne 1998)

Période	Jachère		Labour		Travail minimum du sol	
	Sol brun Vertique	Sol ferrugineux tropical	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Sol brun Vertique	Sol ferrugineux tropical
04 mai- 29 juin	2,1	4,9	-	-	1,8	1,0
01-31 juillet	1,8	4,2	-	0,9	1,8	1,6
01- 31août	0,9	3,9	2,4	0,7	1,3	0,9
01sept-10nov.	1,6	3,7	1,6	1,0	0,8	0,6
Moyenne	1,6	4,2	2,0	0,9	1,4	1,0

Tableau 8 : Teneur des eaux de ruissellement en carbone (mg l^{-1})
(campagne 1999)

Période	Jachère		Labour		Travail minimum du sol	
	Sol brun Vertique	Sol ferrugineux tropical	Sol brun vertique	Sol ferrugineux tropical	Sol brun Vertique	Sol ferrugineux tropical
4mai-29 juin	14,4	15,8	14,5		6,6	9,8
01-31 juillet	8,3	10,5	11,3	9,2	12,2	14,6
01- 31août	19,4	7,6	10,7	13,3	11,7	9,7
01sept- 30sept	10,9	8,8	21,4	18,5	10,7	9,0
01 oct- 20nov.	11,0	10,9	1,7	4,6	7,0	9,6
Moyenne	12,8	10,7	11,9	11,4	9,6	10,5

4.3.2 Les teneurs des sédiments en carbone organique particulaire (POC)

Tout comme les eaux de ruissellement, les sédiments prélevés montrent des teneurs de carbone très variables d'une année à l'autre (tab. 9 et 10), mais en sens contraire. La comparaison des teneurs en POC pour divers pratiques agricoles (jachère, labour, travail minimum du sol) montre, dans la plupart des situations, des teneurs plus élevées dans les sédiments issus de jachère, suivis par ceux du travail minimum du sol.

Dans tous les cas, à l'opposé des eaux, les sédiments de 1998 sont plus riches en carbone que ceux de 1999 et cela quelque soit le type de sol et la pratique agricole. Comme le montrent les tableaux 4 et 5, les sédiments fins (MES) montrent, dans le cas général, des teneurs de carbone particulaire plus élevées que les sédiments grossiers avec un rapport restant inférieur à 2.

Tableau 9 : Teneurs des sédiments en carbone particulaire (mg g⁻¹)
(campagne 1998)

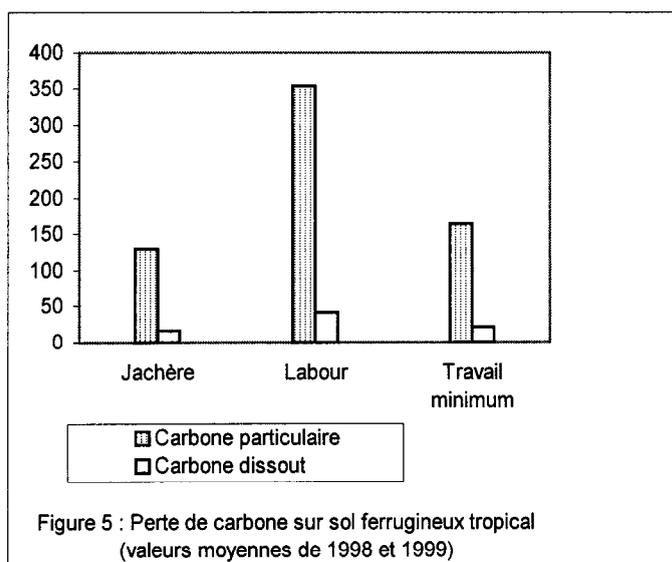
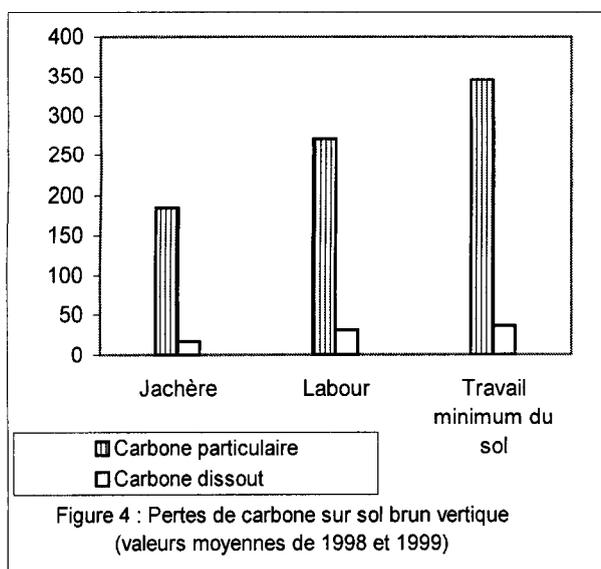
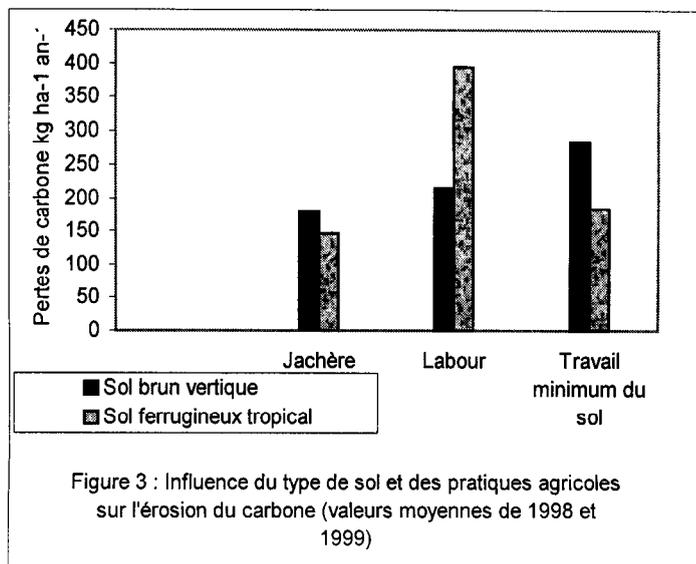
Période	Jachère				Labour				Travail minimum du sol			
	Sol brun Vertique		Sol ferrugineux tropical		Sol brun vertique		Sol Ferrugineux Tropical		Sol brun vertique		Sol Ferrugineux tropical	
	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES
04 mai- 29 juin	40,7	35,2	11,2	24,5	-	-	17,2	-	26,8	47,8	8,0	34,1
01-31 juillet	57,2	93,4	29,0	25,4	-	-	40,0	12,2	26,8	47,8	12,8	17,8
01- 31 août	33,8	34,2	20,7	24,4	23,4	36,0	8,9	13,6	26,8	38,5	34,6	15,5
01sept-10nov.	45,7	76,0	14,4	21,7	29,4	40,2	6,0	14,4	28,2	38,5	13,8	18,0
Moyenne	44,4	59,7	18,8	24,0	26,4	38,1	18,0	13,4	27,2	43,2	17,3	21,4

Tableau 10 : Teneurs des sédiments en carbone particulaire (mg g⁻¹)
(campagne 1999)

Période	Jachère				Labour				Travail minimum du sol			
	Sol brun vertique		Sol ferrugineux tropical		Sol brun vertique		Sol Ferrugineux Tropical		Sol brun vertique		Sol ferrugineux tropical	
	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES	TF	MES
4mai-29 juin	12,2	5,9	3,4	2,6	5,6	5,5	1,7	-	5,6	7,8	2,4	2,7
01-31 juillet	6,8	-	3,0	2,0	4,3	6,4	1,0	1,8	4,3	5,3	1,8	3,4
01- 31 août	6,0	4,2	-	3,2	3,2	5,2	2,7	2,5	3,2	4,9	1,4	2,4
01sept- 30sept	-	10,6	-	3,2	3,4	4,5	3,1	2,7	3,4	9,3	2,5	3,3
01 oct- 20nov.	-	-	-	4,5	-	-	1,6	2,2	3,7	9,3	2,7	3,3
Moyenne	8,3	6,9	3,2	3,1	4,2	5,4	2,0	2,3	4,0	9,2	2,2	3,0

4.3.3 Les pertes annuelles de carbone à l'échelle de la parcelle de 100 m²

Les pertes de carbone varient beaucoup d'une année à l'autre, quelque soit le type de sol, son occupation et la pratique agricole: par exemple, sous jachère, les pertes mesurées ont été 125 kg ha⁻¹ an⁻¹ sur sol brun vertique et 90 kg ha⁻¹ an⁻¹ sur sol ferrugineux en 1998 contre respectivement 238 kg ha⁻¹ an⁻¹ et 202 kg ha⁻¹ an⁻¹ en 1999. Les valeurs moyennes des deux années montrent de plus faibles pertes de carbone sous jachère par rapport aux parcelles cultivées (fig.3). Le labour occasionne plus de perte de carbone que le travail minimum (rapport voisin de 2) sur sol ferrugineux tropical, contrairement à ce qui est observé sur sol brun vertique où la perte de carbone est plus importante avec le travail minimum du sol (sol plus riche semble-t-il). Dans toutes les situations, les pertes de carbone sont nettement plus importantes sous forme particulaire que dissoute (fig.4 et 5).



4.3.4 Evolution des flux de carbone

Dans une situation (de sol, de couvert végétal ou de pratique culturale) donnée, les flux de carbone sont différents d'une période à l'autre au cours de la saison pluvieuse. De façon générale, ces flux sont plus importants en juillet et août (tab.11) qui correspondent aussi aux mois les plus pluvieux de l'année.

Tableau 11 : Flux de carbone au cours des différentes périodes de la saison pluvieuse
(Cas de la campagne 1999)

Période	Jachère				Labour				Travail minimum du sol			
	Sol brun Vertique		Sol Ferrugineux Tropical		Sol brun vertique		Sol ferrugineux tropical		Sol brun vertique		Sol ferrugineux tropical	
	COD	COP	COD	COP	COD	COP	COD	COP	COD	COP	COD	COP
04mai-29 juin	0,5	62,4	3,6	61,8	0	0	0	26	0,5	24,7	7,0	34,1
01-31 juillet	3,0	23,0	7,9	86,5	10,0	166,3	14,6	143,8	6,3	214,4	8,6	117,7
01- 31août	17,3	105,5	5,4	17,8	30,0	139,7	36,3	112,5	38,3	193,9	16,6	106,6
01sept- 30sept	11,0	15,7	4,4	11,2	19,3	11,6	27,2	34,5	25,4	8,3	2,9	8,2
01 oct- 20nov.	0	0	1,8	1,8	0,2	0	2,3	4,4	0,1	3,7	3,6	1,2
Total	32	206,6	23,1	179,1	59,5	317,6	80,4	321,2	70,6	445,0	38,7	263,8

5. Discussions

5.1 Le stockage du carbone dans le sol

La variabilité du stock de carbone en fonction du sol peut s'expliquer par la nature minéralogique des matériaux pédologiques. Une nette prépondérance de la kaolinite (à faible charge électrique) dans le sol ferrugineux tropical n'est pas favorable au stockage du carbone dans le sol. Les meilleurs stocks enregistrés sous jachère et sur parcelle cultivée avec la pratique du travail minimum du sol peuvent s'expliquer par des raisons différentes. La jachère correspond à une plus longue période d'accumulation et de décomposition des débris végétaux. Ce qui est observé au niveau de la parcelle de travail minimum du sol peut s'expliquer par deux facteurs favorables : d'une part, la stimulation de la production de biomasse (fertilisation minérale) et accélération de l'activité faunique, liée à l'accumulation de mulch suite à l'herbicide de début de saison.

5.2. Ruissellement et érosion

Les différences de caractéristiques de ruissellement et d'érosion observées ici entre sol brun vertique et sol ferrugineux tropical sont principalement liées aux caractéristiques minéralogiques et organiques de ces sols. Toutes ces propriétés qui influent sur la stabilité structurale et la résistance à l'érosion sont plus favorables sur le sol brun vertique en place (Diallo et al, 1998 ; Diallo, 2000). En ce qui concerne l'influence du mode de gestion de la biomasse, notons que la jachère et le travail minimum du sol ont le mérite de protéger le sol contre l'agression des pluies et de favoriser l'infiltration.

La plus forte érosion annuelle de 1999 est une conséquence de la forte pluie enregistrée.

5.3 Erosion du carbone

La teneur en carbone des eaux de ruissellement et des sédiments semble dépendre des types de sol, et dans une moindre mesure, des pratiques agricoles : la concentration en carbone du matériau pédologique influence directement la teneur en carbone des sédiments qui y sont arrachés, de même que celle des eaux qui véhiculent ces sédiments. Cela explique les plus fortes teneurs des eaux et des sédiments issus des parcelles de sol brun vertique (plus riche en carbone que le sol ferrugineux tropical). Dans la même situation pédologique et d'utilisation des sols, la quantité annuelle de pluie semble avoir une nette influence sur la teneur en carbone des eaux de ruissellement et des sédiments. Une forte quantité annuelle de pluie favorise la désagrégation des particules du sol et la libération de la matière organique :

les eaux de 1999 sont en effet plus riches que celles de 1998. Dans tous les cas, la quantité annuelle de terre érodée et le volume d'eau ruisselé déterminent la quantité de carbone perdue par an, d'où les plus importantes pertes en 1999. Dans le détail, les pertes de carbone au cours de différentes périodes de la saison restent fonction des précipitations reçues, facteur déterminant le ruissellement et l'érosion, toute condition étant égale par ailleurs.

5.4. Erosion du carbone dans le bassin versant

On a déjà souligné la forte différence d'érosion de terre et de carbone entre l'année 1998, représentative des pluies moyennes, et l'année 1999 dont les mois de juillet et août ont eu des pluies beaucoup plus agressives. Bilgo et al (2004) ont trouvé également des différences importantes de flux de carbone en année exceptionnellement humide au Burkina Faso.

Il est intéressant de comparer les pertes en carbone observées sur les parcelles d'érosion aux exportations de carbone organique par les eaux des rivières. Le bassin de Djitiko a une superficie de 103 km² et la rivière qui le draine se jette dans le fleuve Niger non loin de Banankoro, station hydrométrique bien connue (Droux, 1999). A Banankoro le bassin versant du Niger est de 72000 km². Les valeurs mesurées de carbone organique dissout varient de DOC = 0.1 à 4 mg l⁻¹ et les valeurs de carbone particulaire POC = 0.1 à 2 mg l⁻¹, avec des moyennes annuelles pondérées par les débits et calées sur le cycle hydrologique de DOC = 1.7 mg l⁻¹ et de POC = 1.2 mg l⁻¹ (Picouet, 1999). Ceci donne une exportation annuelle par les eaux de rivière de 5.9 kg ha⁻¹ an⁻¹ de DOC et 4.2 kg ha⁻¹ an⁻¹ de POC.

Si on compare avec les teneurs en DOC des eaux de ruissellement recueillies aux parcelles d'érosion (Tableaux 7 et 8), on observe qu'en année normale (1998) les teneurs moyennes sont du même ordre de grandeur (DOC = 0.9 à 4.2 mg l⁻¹) que dans le Niger, mais que celles de 1999 sont nettement plus élevées (DOC 99 = 9.6 à 12.8 mg l⁻¹) : peut-être peut-on l'expliquer par l'abondance du ruissellement cette année et la culture du coton qui couvre mal le sol. En ce qui concerne le carbone particulaire, les teneurs sont nettement plus élevées sur les parcelles d'érosion (POC = 17 à 44 mg g⁻¹ en 1998 et 2 à 9 mg g⁻¹ en 1999) que celles du Niger. Cette fois les teneurs en POC diminuent lorsque la pluie et l'érosion augmentent (campagne 1999), en particulier les terres de fond, moins riches en carbone.

En conclusion, la charge en carbone soluble se forme déjà sur les parcelles et ne varie pas beaucoup quand on passe à un grand bassin versant. Par contre la charge en carbone particulaire peut être 20 à 40 fois plus forte sur les parcelles et les flux de carbone particulaire (figure 3 : Erosion du carbone = 150 à 350 kg ha⁻¹ an⁻¹) peut être 30 à 80 fois plus forte que dans le fleuve.

6. Conclusion

Le stock de carbone dans la couche superficielle du sol dépend fortement du type de sol, de la teneur et du type d'argile, des pratiques agricoles et du mode de gestion de la biomasse. La pratique du travail minimum du sol, testée dans ce milieu pour la première fois, se montre efficace par son influence sur le stock organique, le ruissellement et l'érosion. Son rôle dans le contrôle de la perte de carbone par érosion est comparable à celui de la jachère. Les deux années de mesure ont montré que le labour est responsable d'une plus grande perte de carbone. Cependant la poursuite des expérimentations est nécessaire pour caractériser d'avantage l'influence des pratiques agricoles sur les pertes de carbone, en fonction des variations climatiques.

Enfin les pertes en carbone dissout sont du même ordre de grandeur à la parcelle et dans le Niger : tout le DOC est donc exporté du paysage. Par contre, les exportations de carbone particulaire (POC) par les rivières ne représentent que 1 à 3% des pertes à la

parcelle : la majorité du carbone organique particulaire reste piégé dans le paysage, dans les micro-dépressions et les zones d'épandage des colluvions et des alluvions.

7. Références

- Bilgo A., Hien V., Serpantié G., Masse D., Chotte JL., Fournier J, Zaonero P., 2004.** Matières organiques et minérales déplacées par l'érosion hydrique sur des parcelles cultivées, en jachère, ou mixtes en zone de savane soudanienne (Burkina Faso) Bull. Réseau Erosion 22.
- Birot P., 1981.** Les processus d'érosion à la surface des continents. Masson. 607 p.
- CTFT, 1979.** Conservation des sols au Sud du Sahara. Min. Coop., Paris, 295 p.
- Diallo D., 2000.** Erosion des sols en zone soudanienne du Mali. Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger). Thèse de doctorat de l'Université Grenoble : 202 p
- Diallo D., Roose E., Barthès B., Khamsouk B., Asseline J., 1998a.** Recherche d'indicateurs d'érodibilité des sols dans le bassin versant de Djitiko (Haut Bassin du Niger au Sud Mali). Bull. Réseau Erosion 18 : 336-347.
- Diallo D., Roose E., Barthès B., 1999.** Comparaison de tests d'érodibilité des sol en laboratoire et de mesure sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko (zone soudanienne du Mali-sud). Bull. Réseau Erosion 19 :168 -175.
- Droux JP., 1999.** Hydrologie et flux de matières solides et dissoutes sur petits bassins du fleuve Niger au Mali (bassins Dounfing, Djitiko et Bélékoni). Thèse Géographie, Strasbourg I, 304 p.
- Fauck R., 1956.** Erosion et mécanisation agricole en Casamance (Sénégal) . Bureau des Sols D'Afrique Occidentale , 24 p.
- Feller C. , Beare MH., 1997.** Physical control of soil organic matter in the tropics. Geoderma 79 : 69-116.
- Fournier F., 1967.** La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. Sols africains, 12, 1 : 5-53.
- Mietton M., 1988.** Dynamique de l'interface litho-atmosphère : érosion en zone de savane au Burkina Faso. Thèse d'Etat en Géographie, Univ. Grenoble, 511 p.
- Neboit R., 1983.** L'homme et l'érosion. Fac. Lettres et Sc. Hum., Clermont-Ferrand II, Fasc. 17, 183 p.
- Orange D., Arfi R., Benech V., Kuper M., Matieu B., Sidibé I., 2002.** Impact de la dynamique hydrologique sur les cycles de nutriments en zone inondable tropicale sahélienne. In Orange *et al.* (Ed.): Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires, IRD, Paris : 259-277.
- Picouet C., 1999.** Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé. Le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse Sc. Univ. Montpellier II : 350 p.
- Roose E., 1967.** Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agron. Trop. 22, 2 : 123-152.
- Roose E., 1978.** Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du plateau Mossi (Haute-Volta) : Gonsé 1968-74. Cah. Orstom Pédol., 16, 2 : 193-223.
- Roose E , 1979.** Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite, sous culture et sous savane arbustive soudanienne du Nord Côte d'Ivoire : Korhogo, 1967-75. Cah. Orstom Pédol., 17, 2 :81-118.
- Roose E.,1981.** Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse de doctorat es. Sc. de l'Université d'Orléans, Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris, n° 130 : 567p.
- Roose E., Piot J., 1984.** Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Upper-Volta) IASH, 144 : 485-498.
- Sivakumar M.V.K, 1989.** Agroclimatic aspects of rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of an international workshop : Soil, crop, and water management systems for rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian Zone (11-16 janvier 1987), ICRISAT Sahelian Center Niamey, Niger , p 17-38
- Starr G.C., Lal R., Malone R., Hothem D., Owens L., Kimble J., 2000**
Modeling soil carbon transported by water erosion process. Land Degrad. Develop. II: 83-91
- Verney R., Volkoff B., Willaime P., 1965.** Résultats des études de l'érosion sur parcelles expérimentales au Dahomey. Coll. " Conservation et amélioration de la fertilité des sols ". Khartoum, OUA/STRC, Publ. 98 : 43-53.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Diallo, D.; Orange, D.; Roose, E. - Influence des pratiques culturales et du type de sols sur les stocks et pertes de carbone par érosion en zone soudanienne du Mali, pp. 193-207, Bulletin du RESEAU EROSION n° 22, 2004.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr