

L'érosion, une question importante pour la séquestration du carbone par les écosystèmes continentaux

CHRISTIAN FELLER¹, MARTIAL BERNOUX², ÉRIC ROOSE²

¹ IRD Madagascar, B. P. 434, 101 Antananarivo, Madagascar

² Centre IRD Montpellier, Labo. MOST, B. P. 64501, F-34394 Montpellier cedex 5
Courriels : feller@ird.mg , bernoux@mpl.ird.fr ou roose@mpl.ird.fr

1. Problématique

Les préoccupations sur le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (en particulier CO₂, CH₄, N₂O) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en termes de source ou de puits de carbone. Les sols constituent un important réservoir de carbone, environ mille cinq cents milliards de tonnes, ce qui équivaut à presque trois fois la quantité stockée dans la biomasse terrestre, et deux fois celle de l'atmosphère. Toute modification de l'usage des terres et, même toute modification de l'itinéraire technique des sols agricoles, peut induire des variations du stockage du carbone dans les sols. En outre le carbone (C) du sol est particulièrement intéressant pour lutter contre l'érosion : en effet la matière organique (MO) a un rôle majeur sur la stabilité des agrégats (et propriétés physiques liées), l'érodibilité du sol, et le stock de nutriments (NPK, etc.) indispensable à une production durable des couverts végétaux. Ainsi une bonne gestion de la biomasse est une solution assurant la sécurité alimentaire, la conservation de ressources en eau et en sol, et une lutte contre les gaz à effet de serre.

Ponctuellement, les variations de stock de C sont dues à divers *processus*: modification des apports de MO, transfert de C sous forme solide (particulièrement par érosion) ou soluble (lixiviation par les eaux de drainage et de ruissellement), et surtout pertes par minéralisation (CO₂, CH₄) de la MO des sols. Il est donc naturel que les sols apparaissent comme potentiellement importants dans le contrôle des stocks et flux de C et l'érosion est un des *processus* à étudier.

Dans le bilan global du C, les flux de C érodé (sous la forme solide ou soluble) des sols vers les sédiments fluviaux, lacustres ou marins ne sont pas du tout négligeables puisqu'ils représentent 0,6GtC/an à comparer aux émissions totales de C-CO₂ dues aux écosystèmes continentaux qui sont de l'ordre de 1,5GtC/an. Aussi, dans les relations entre érosion, ruissellement et séquestration du C, doit-on s'in-

terroger sur les différents points suivants :

- le C érodé (solide et soluble) fait-il partie du bilan de la « séquestration du C ». Autrement dit, qu'est-ce que la séquestration du C ?
- au cours de son cheminement de l'amont vers l'aval, le C érodé est-il transformé ? et quel impact cela a-t-il sur le bilan de la séquestration ?
- que se passe-t-il aux différentes échelles de paysage ?
- quelles sont les pratiques agricoles et forestières permettant à la fois une lutte contre l'érosion et une séquestration accrue du C ?

2. C érodé et séquestration du C

On utilise ici la définition proposée par Bernoux *et al.* (2004) qui considère que la « séquestration du carbone » C est « le résultat du bilan net, exprimé en équivalents C-CO₂, de tous les flux de GES (CO₂, CH₄ et N₂O) à l'interface sol-plante-atmosphère, induits par une nouvelle pratique agricole ». Autrement dit : (i) la séquestration de C ne concerne pas seulement les flux de CO₂, (ii) la séquestration de C ne concerne que les flux gazeux entre le sol et l'atmosphère et non d'autres flux sous forme de C solide ou soluble comme c'est le cas lors du cycle érosion et sédimentation le long d'une toposéquence. Or, au cours d'une étude, il se peut qu'une partie des variations de stocks de C du sol observées soit due à une perte de C par érosion sur les parcelles en amont et une accumulation en aval par col-luvionnement. Selon la définition ci-dessus, cette variation de stock de C ne doit pas être comptée comme une « séquestration » ou « déséquestration » de C : la notion de « stockage » de C est donc différente de la notion de « séquestration de C ». Ceci étant, on peut imaginer aussi qu'au cours du transfert de C solide ou soluble de l'amont vers l'aval, il y ait, pour une raison ou une autre, changement du *turn-over* du carbone qui devient plus ou moins labile.

3. Comportement du C érodé

Cet aspect du changement de la stabilité du C du sol lors du cycle érosion-transfert-sédimentation est très peu documenté. Ainsi, la désagrégation et détachement des particules de sol sur le site initial, transferts par érosion, sédimentation peuvent conduire, soit à une augmentation de la minéralisation du C érodé-sédimenté, soit au contraire à sa protection contre la minéralisation microbienne. En effet, dans l'état actuel des connaissances, on sait que le seul *processus* de désagrégation tend à augmenter le potentiel de minéralisation du C organique par déprotection de la MO. Mais, par ailleurs, du C originaire d'un sol de surface et stocké dans un sédiment peut devenir aussi moins facilement minéralisable par protection au sein du sédiment ou par changement des conditions d'oxygénation. Finalement la discussion reste ouverte entre les partisans qui affirment que l'érosion n'entraîne qu'un transfert de C sans changement des bilans de CO₂, et ceux qui pensent que les émissions de CO₂ sont accrues lors du transfert ou au contraire que ces émissions sont diminuées dans le sédiment par rapport au sol original, les deux *processus* pouvant intervenir successivement.

4. Niveau du C érodé en fonction de l'échelle étudiée

4.1 Au niveau de la parcelle

Au colloque de Montpellier (Roose *et al.*, 2004), de nombreuses données ont été présentées sur l'importance des pertes de carbone par divers *processus* d'érosion à l'échelle de la parcelle en milieux tropicaux et méditerranéens. Par rapport à la biomasse produite (1 à 20 t/ha/an) les pertes en C particulaire par érosion sont modestes et ne représentent que 1 à 50 kg/ha/an en milieux bien protégés (forêts, prairies, cultures sous litière ou plantes de couvertures), mais 50 à 500 kg C/ha/an sous cultures sarclées ou savanes brûlées et peuvent atteindre plus de 1 000 kg C/ha/an sur sol dénudé en milieu très agressif. Les pertes de C soluble dans les eaux de ruissellement et de drainage sont peu connues et varient de 1 à 600 kg C/ha/an selon l'importance du drainage. Il est très important de s'interroger sur la nature du C érodé : est-ce une forme à *turn-over* rapide ou non ? On sait, par exemple que les « débris végétaux » (de la taille des sables) du sol ont un *turn-over* rapide alors que le C associé aux fractions limoneuses et argileuses a un *turn-over* beaucoup plus lent. D'où l'importance d'évaluer si l'érosion observée est sélective ou non ? Seule l'érosion en nappe est franchement sélective vis-à-vis du C. Par rapport aux dix premiers centimètres du sol, le coefficient de sélectivité du C du sol varie de 0,5 à 14 et tend à décroître quand l'érosion augmente. On distingue cinq groupes principaux de coefficients : les sols nus ($1,2 \pm 0,2$), les sols cultivés et les parcours dégradés ($2,0 \pm 0,5$), les savanes herbues ($2,7 \pm 1$), les savanes arbustives ($4,2 \pm 3,2$) et les forêts denses ($7,5 \pm 4,5$). Les pertes en C particulaire dépendent plus du volume érodé que des teneurs en C de la surface du sol, car si l'érosion diminue, les teneurs en C du sédiment transporté augmentent.

Les pertes en C par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur que la capacité de séquestration du C dans le sol ($0,1$ à $2,5$ t C/ha/an). Par conséquent, la lutte antiérosive biologique (paillage, plantes de couvertures, forte densité, etc.), en couvrant mieux le sol, réduit les pertes par érosion et drainage et apporte plus de C au sol. L'effet « double gain » se traduit par l'augmentation des stocks de MO des sols restaurés et une séquestration du C accrue (sous réserve de non émission supplémentaire des autres GES comme CH_4 et N_2O). La conservation des sols et surtout, la restauration des sols dégradés, représentent donc un puits de C dont il serait utile de connaître les retombées économiques et environnementales.

4.2 Échelle du versant

Les stocks de carbone des sols sur les versants varient en fonction des *processus* d'érosion, des formes de pente, de la rugosité de la surface du sol et de la densité du couvert végétal au ras du sol. L'érosion aratoire (déplacement en masse par les outils de travail du sol) dépasse souvent l'érosion en nappe sur les surfaces convexes cultivées depuis des siècles avec des dépôts colluvionaires très abondants en bas de pente concave ou sur les talus en limite des parcelles. Les labours répétés peuvent effacer les ravines sur les versants. Le pâturage entraîne le tassement de la surface du sol, un ruissellement abondant et le ravinement actif des drainilles,

chemins reliant les parcours des hautes terres et la source d'abreuvement : il permet la concentration des nutriments sur les parcs de repos et les champs voisins du parcage ou les champs de case.

La fraction du C particulaire érodé diminue en fonction de la distance de son cheminement et les teneurs en C organique particulaire (COP) baissent lors des forts charriages car le ravinement décape les horizons profonds, plus pauvres en MO (donc en C) que la surface.

4.3 Echelle continentale : les flux de C dans les fleuves

À l'échelle des petites rivières et des lacs collinaires, l'ensemble du C sédimenté provient d'une seule source : la MO des sols (Albergel *et al.*, 2004). Par contre dans les grands bassins versants les *processus* sont plus complexes faisant intervenir d'autres formes de C (soluble) et des origines multiples (altérations des roches, filtres biologiques).

Une faible partie des exportations de C sous forme particulaire et/ou soluble se retrouve naturellement dans les grands fleuves. Le C présent dans les rivières l'est aussi sous une forme inorganique et, dans ce dernier cas, provient (i) de l'atmosphère (ii) de l'altération des roches, qu'elles soient carbonatées ou silicatées. Dans les rivières et les fleuves, l'exportation de C organique est en règle général très limitée (environ 1 % de la production de la biomasse sur le continent), ce qui correspond à un flux constant de cinq cents millions de tonnes par an. Le transfert de C dans les fleuves est contrôlé par de nombreux *processus* physico- ou biochimiques, les sols étant fortement impliqués. Par exemple, les flux de C transportés dans l'immense bassin Amazonien (6 400 000 km²) ont été précisément mesurés, et il est estimé que l'apport net de C organique des zones humides et des affluents secondaires du cours inférieur de l'Amazone est de quatre millions de tonnes de C par an et serait donc responsable de 8 à 10 % de l'exportation totale de C organique des fleuves du monde (Seyler *et al.*, 2004).

5. Importance des pratiques forestières et agricoles sur l'érosion et la séquestration du C

S'il est clair que les forêts stockent du C dans le bois et dans le sol (> 100tC/ha sur 30 cm de sol dans le Rif, Maroc), il a été démontré que le pâturage extensif ou intensif mal géré dégrade la végétation et entraîne une perte de C du sol de l'ordre de 40 %. Pour la culture des céréales, la perte est de 60 %. Heureusement, la reforestation avec des espèces à croissance rapide (*Pinus halepensis* ou *Eucalyptus camaldulensis*) reconstruit 90 % du stock de C initial si l'on sait attendre 40 ans. Mais cette solution forestière ne satisfait que rarement la population paysanne. Par contre l'agroforesterie (oliviers ou fruitiers associés à diverses cultures) est intéressante pour l'environnement, qui a des effets identiques à ceux de la forêt en terme de dynamique de stockage de C (80 % du stock de C du sol reconstitués en quarante ans), améliore les revenus des ménages et permet de restructurer l'exploitation des versants pentus en ménageant des aires d'*impluvium* et des aires de production végétale intensive.

Le rôle des feux de brousse est plus complexe qu'on ne le croit : il accélère la

minéralisation de la biomasse, mais produit du charbon de bois qui persiste plus longtemps dans le sol que les composés humifiés. L'impact du feu sur le ruissellement et l'érosion est temporaire : il augmente les risques de ruissellement et d'érosion sur sol dénudé mais favorise par ailleurs la régénération de certaines espèces qui couvrent et protègent rapidement le sol.

L'influence du (sur)-pâturage sur l'érosion et la dynamique du C du sol est mal connue. En effet, les animaux consomment 50 à 60 % de la biomasse ingérée et n'en restituent que 40 % sous forme de déjections. Mais la gestion de ces MO, plus riches en azote, permet de concentrer la fertilité du paysage et la fumure organique dans les zones de cultures intensives (sols plus profonds). Il est apparu nécessaire d'étudier l'influence du mode d'élevage sur la production des GES (CO₂, mais surtout CH₄ et N₂O, beaucoup plus efficaces en terme de réchauffement) et les risques de ruissellement, de ravinement le long des drailles. Le rôle positif de jachères courtes à légumineuses sur le stock de C du sol est bien connu, mais pourrait être contrebalancée par l'augmentation de la production de N₂O. Son introduction à grande échelle en Afrique exige un changement profond des traditions de vaines pâtures et de feux de brousse en saison sèche. La fumure organique et le compost améliorent la production des cultures, mais ne laisse dans le sol que très peu de C après une saison culturale : de toute façon un apport complémentaire d'engrais minéraux (en particulier en phosphore) reste indispensable pour une agriculture intensive et durable.

Les nombreux essais de semi direct sous litière en Amérique latine (Brésil, Argentine et Mexique) et en Afrique (Cameroun, Mali, Maroc) démontrent le double impact de ce système sur la réduction des risques d'érosion et l'augmentation de la séquestration du C (0.5 à 2 t C/ha/an) dans les horizons superficiels du sol (voir les travaux présentés dans Roose *et al.*, 2004b). Bien que le nombre et la durée des expérimentations soit encore trop limités, on peut confirmer un bénéfice environnemental et un bénéfice économique (moins de travail et d'énergie consommée). On manque encore de données en zones semi-arides. Pour que la réduction des pertes par érosion ne soit pas compensée par l'augmentation du drainage, il faut prévoir l'intensification de l'utilisation des ressources en eau, fertilisation raisonnée, forte densité, agroforesterie, etc. Une attention particulière doit être portée sur le mode de gestion des résidus de culture, adventices et plantes de couverture qui sont plus efficaces si elles sont maintenues en surface plutôt qu'enfouies : ces résidus absorbent complètement l'énergie des pluies et du ruissellement et se décomposent plus lentement, en restituant progressivement les nutriments.

Là où les grands chantiers de terrassement des versants ont souvent échoué, la lutte biologique (haies vives, parcs arborés, jachères courtes de légumineuses, cultures intercalaires, bandes enherbées, gestion à la surface du sol des résidus de culture, des adventices et des plantes de couverture, travail limité du sol, etc.)

a démontré son efficacité à réduire le ruissellement et surtout l'érosion en milieux assez humides. Cependant, une gestion simultanée des états de surface du sol et de la fertilisation raisonnée est indispensable pour améliorer la productivité des terres et du travail. La gestion raisonnée de la biomasse et de la fertilisation complémentaire peut apporter des solutions satisfaisantes dans les agro systèmes et relever le défi du XXI^e siècle : nourrir une population qui double tous les vingt ans, tout en réduisant les risques environnementaux.

6. Conclusions et perspectives

De nombreux travaux sont encore nécessaires afin de mieux comprendre et quantifier précisément l'influence de l'érosion et des pratiques de lutte antiérosive sur la séquestration du C aux différentes échelles.

À l'échelle parcellaire, si l'on dispose de mesures sur l'indice de sélectivité vis-à-vis du C par l'érosion, permettant ainsi de qualifier et quantifier le C déplacé, on quantifie encore mal le C déplacé sous forme dissoute dans les eaux de ruissellement et de drainage. Dans les zones tropicales humides, les teneurs en C organique dissous (DOC) ne sont pas négligeables (de 1 à 600 kg C ha⁻¹ an⁻¹) et la composition des eaux de ruissellement est semblable à celle des rivières en termes de DOC. Il y a un fort besoin de données sur le pourcentage d'agrégats qui sont déposés en bas de pente, dans les rivières et dans les océans, mais surtout sur leur susceptibilité à être minéralisés lors du transport ou après sédimentation.

Au niveau des versants les phénomènes sont plus complexes. Certaines méthodes basées sur les traceurs (137Cs, 13C...) permettent d'appréhender la variabilité spatiale des flux, mais des améliorations sont indispensables pour confirmer si la déposition initiale est vraiment homogène dans l'ensemble du paysage même lorsque les précipitations dépendent des vents qui peuvent changer de direction.

Références bibliographiques

- ALBERGEL, J., MANSOURI, T., ZANTE, P., BEN MAMOU, A., ABDELJAOUED, S., 2004, « Matière organique dans les sédiments des barrages collinaires en zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie », pp. 468-478, *In, Bulletin du réseau Érosion* 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.
- BERNOUX, M., FELLER, C., ESCHENBRENNER, V., CERRI, C. C., CERRI, C. E. P., 2004, « Séquestration du carbone dans les sols », pp. 29-42, *In, Bulletin Réseau Erosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.
- ROOSE, É., DE NONI, G., PRAT, C., GANRY, F., BOURGEON, G., (dir.), 2004a, *Bulletin du réseau Érosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone, IRD-CIRAD, 493 pp.
- ROOSE, É., DE NONI, G., PRAT, C., GANRY, F., BOURGEON, G., (dir.), 2004b, *Bulletin réseau Érosion* n° 23, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 2, Séquestration du carbone et érosion des sols, IRD-CIRAD, 636 pp.
- SEYLER, P., MOREIRA-TURCQ, P., COYNEL, A., ETCHEBER, H., GUYOT, J.-L., 2004, « Flux de carbone organique de l'Amazonie et de ses principaux affluents », pp. 420-431, *In, Bulletin du réseau Érosion* n° 22, Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone, actes 1, Érosion du carbone (Roose, É., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., dir.), IRD-CIRAD, 493 pp.

Actes des Journées scientifiques
du réseau de chercheurs
Érosion et GCES

**ÉROSION ET
GESTION
CONSERVATOIRE DE
L'EAU ET DE LA
FERTILITÉ DES SOLS**

Sous la direction de :

**Simone Ratsivalaka
Georges Serpantié
Georges De Noni
Éric Roose**



Éditions scientifiques GB

as

actualité scientifique



Agence universitaire de la Francophonie



Université d'Antananarivo



Agence universitaire de la Francophonie

ÉROSION ET GESTION CONSERVATOIRE DE L' EAU ET DE LA FERTILITÉ DES SOLS

ACTES
DES JOURNEES SCIENTIFIQUES
DU RÉSEAU ÉROSION ET GCES DE L'AUF
ANTANANARIVO (MADAGASCAR) , DU 25 AU 27 OCTOBRE 2005

Sous la direction de

Simone RATSIVALAKA
Georges SERPANTIÉ
Georges DE NONI
Éric ROOSE

Copyright© 2006 Contemporary Publishing International (C.P.I). Publié sous licence par les Éditions scientifiques GB et en partenariat avec l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF)

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit (électronique, mécanique, photocopie, enregistrement, quelque système de stockage et de récupération d'information) des pages publiées dans le présent ouvrage faite sans autorisation écrite de l'éditeur, est interdite.

Éditions scientifiques GB
41, rue Barrault
75013 Paris
France

ISBN : 2-84703-032-8

Les textes publiés dans ce volume n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. Pour faciliter la lecture, la mise en pages a été harmonisée, mais la spécificité de chacun, dans le système des titres, le choix de transcriptions et des abréviations, l'emploi de majuscules, a été souvent conservée.