

Erosion du carbone et indice de sélectivité à l'échelle de la parcelle dans des régions tropicales et méditerranéennes

Eric ROOSE

Réseau Erosion, Lab. MOST, centre IRD BP 64501 Montpellier, F 34394, Cedex 5
E mail : roose@mpl.ird.fr

Résumé

Dans le cadre du réchauffement climatique mondial, se pose le problème de l'importance de l'érosion sur la séquestration du carbone dans les sols à l'échelle de la parcelle et du paysage. Certains auteurs estiment que l'érosion n'a aucun rôle sur la production de gaz à effets de serre : il s'agit d'un transfert de matière avec dépôts localisés. S'ils sont plus stables que les sols, ces dépôts localisés pourraient d'ailleurs réduire les risques de minéralisation des matières organiques dans les colluvions, les alluvions et les sédiments marins. D'autres pensent que la dispersion des particules de sol et le désenclavement du carbone séquestré dans les agrégats permettent une meilleure aération et donc des risques accrus de minéralisation des matières organiques érodées. Dans ce cas, le transfert de matières organiques entraînerait des pertes gazeuses (20 à 80% selon les auteurs), mais on manque de confirmation. L'érosion réduirait alors sérieusement la séquestration du carbone dans les sols (1.2 Gt/an selon Lal, 2003).

Dans cette synthèse, l'auteur a revisité des données anciennes ou récentes (54) sur les pertes en terre (E) et en carbone, l'indice de sélectivité de l'érosion en nappe en faveur du carbone (CER) à l'échelle de la parcelle (100 à 1000 m²) sur 14 sites en zones méditerranéennes ou tropicales francophones.

Trois domaines semblent pouvoir être individualisés :

1. les milieux bien protégés par une litière (forêts, savanes non brûlées, prairies denses, cultures bien paillées ou sur plantes de couvertures) : les pertes en terre sont très réduites ($E = 0,1$ à 3 t/ha/an), l'érosion du carbone est négligeable ($C_{\text{érodé}} = 0,1$ à 50 kg/ha/an) et l'indice de sélectivité est très élevé (CER = 2.5 à 14 ; Médiane (Md) = 3.3) ;
2. les milieux profondément anthropisés (cultivés, labourés ou non, les parcours très dégradés) couvrant partiellement la surface du sol : l'érosion peut être importante ($E = 1$ à 150 t/ha/an) ainsi que les pertes en carbone ($C_{\text{érodé}} = 50$ à 350 kg/ha/an ; Md = 250) et l'indice de sélectivité assez fort (CER = 1.2 à 3 ; Md = 1.7 à 2.1) ;
3. les terres nues, les pentes fortes et les sols volcaniques, les jachères et parcours très dégradés sous des climats très humides, l'érosion peut atteindre 20 à 200 t/ha/an et les pertes en carbone par érosion de 300 à 3000 kg/ha/an. L'indice de sélectivité est faible (CER = 0,5 à 1.5 ; Md = 1.2).

Parmi les facteurs les plus importants fixant le niveau des pertes en carbone solide (POC), citons d'abord le poids de terre érodée, la couverture du sol (litière, cailloux, adventices), la teneur en carbone, en argile et en agrégats stables de l'horizon superficiel, le type d'érosion, la pente, le travail du sol, les feux de brousse.

Les processus de ruissellement et de lessivage entraînent aussi des pertes en carbone dissout (DOC) qui peuvent varier de 1 à 600 kg/ha/an, selon l'abondance des pluies.

Dès lors la lutte antiérosive biologique aurait trois avantages : réduire l'érosion en couvrant le sol, fournir de la MO à la surface du sol et améliorer les propriétés physiques (agrégation, infiltration), chimiques (apports de N+ P + divers cations) et biologiques de l'horizon superficiel si important pour la réduction du ruissellement et de l'érosion.

Mots-clés : Sols tropicaux, Sols méditerranéens, Erosion du carbone, Indice de sélectivité, Utilisation des terres, Taux d'argile, Erosion hydrique, Pente

Carbon eroded and selectivity of sheet erosion at the plot scale in tropical and mediterranean areas .

Abstract

This communication is concerned by the importance of hydric erosion on soil carbon sequestration at the scale of 100 to 1000 m² plots and the landscape. Some authors think that erosion is not related to CO₂ gaz emission because eroded carbon is depositing downstream the hillslopes (colluvium), in the valleys (alluvium) or finally in the ocean (sediments) : it corresponds to transfer and may lead to carbon sequestration increase in colluvium, alluvium and oceanic sediments. Other researchers think that soil aggregates degradation and particles dispersion increase the oxigenation possibilities and accelerate the soil organic carbon mineralization. The tranfer by hydric erosion would produce gazeous losses (20 to 80% along the authors estimations), but confirmations are still missing. After Lal (2003), erosion (E) would decrease the carbon sequestration in the soils of the world by 1.2 Gt C/year. In this paper, the author has analysed old and new datas (54) on soil & carbon losses by sheet erosion, Carbon enrichment ratio (CER) in the sediments at the plot scale (100 to 1000 m²) on 14 stations in mediterranean & tropical areas.

Three situations have been observed :

1. Soil surface well protected by a mulch of litter (forests, not burned savannahs, dense grazing lands). Soil erosion is very low ($E = 0.1$ to $3 \text{ t ha}^{-1}\text{year}^{-1}$), carbon eroded also ($0,1$ to $50 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and the C enrichment ration is very high (CER= 3 to 14 ; Median= 3.3).
2. Tilled and clean weeded cropping systems or overgrazed lands, covering partially the soil surface. Erosion can be high (1 to $150 \text{ t ha}^{-1}\text{year}^{-1}$) and the carbon eroded too (50 to 350 kg C/ha/year): CER can still be important on sandy loam soils (CER = 1.2 to 3 ; Md = 1.7 – 2.1).
3. Bare plots, very steep slopes, volcanic or Vertic soils very rich in clay, very well aggregated soils under very rainy climates. Erosion may attain 20 to 200 t/ha/year and Carbon eroded 300 to 3000 kg C/ha/year. The CER is generally weak (CER = 0,5 to 1,5 ; Md = 1.2).

The most important factors of carbon erosion are soil losses, carbon content of the topsoil, the land use, the erosion type and secundarily the clay content and the stable macro-aggregates, the litter and the stone cover over the soil surface, the slope gradient, the tillage and burning practices, etc. Runoff and drainage water can also transfer dissolved carbon (DOC) which can attain 1 to 600 kg C /ha/year in relation to the rainfall abundance.

The biologic soil and water conservation systems would have three advantages : reducing carbon and soil losses by covering better the topsoil, increasing the SOC of the topsoil and then improving the physical, chemical and biologic properties of the topsoil which are very important to maintain infiltration and to reduce erosion losses.

Key words : Tropical soils, Mediterranean soils, Eroded carbon, Carbon enrichment ratio, Texture, Land use, Slope gradient.

1. Introduction

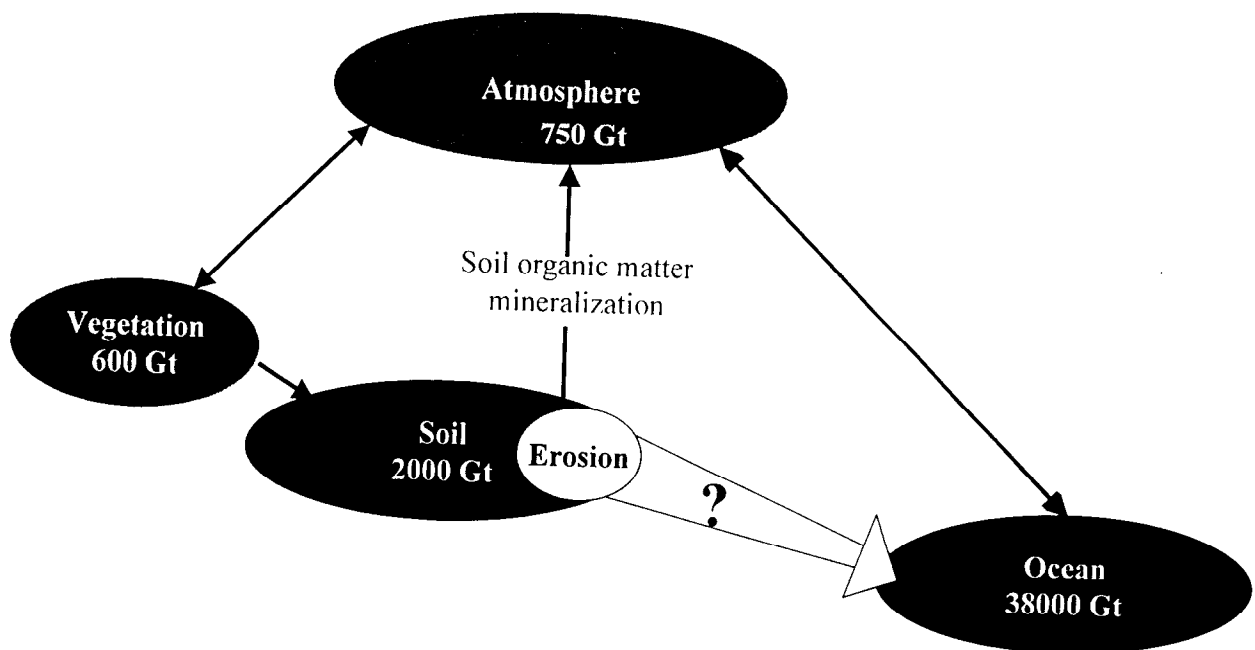
La gestion de la biomasse a une importance majeure à la fois sur le stock de carbone du sol, sur la résistance du sol à l'érosivité des pluies et sur l'émission de CO₂ et autres gaz à effet de serre (Wan et El-Swaifi, 1997 ; Roose et Barthès, 2001 ; Jacinthe et al., 2002 ; Lal, 2003).

1.1. Problématique : la minéralisation du carbone et le réchauffement climatique

Lal(2002) et Robert (2004) ont montré la simultanéité entre l'augmentation du taux de CO₂ de l'atmosphère et le réchauffement de la terre depuis l'ère industrielle, l'augmentation de la population et l'extension des défrichements.

Or on peut observer à la figure 1 que pour réduire le taux de CO₂ de l'air on peut fixer

Figure 1. Problématique : la place de l'érosion dans le bilan du carbone.



le carbone soit dans la végétation pérenne arborée (stock mondial = 600 Gt C) soit dans la matière organique du sol (stock mondial de 2000 Gt C). Mais une partie des matières organiques du sol minéralise chaque année, tandis qu'une autre partie est emportée par l'érosion des horizons superficiels humifères (0.6 à 1.2 Gt C) ou en solution dans les eaux de drainage. On dispose de très peu de mesures du carbone exporté par l'érosion hors des champs cultivés et encore moins de la fraction de ce carbone érodé qui se dépose avec les colluvions de bas de pente, avec les alluvions des rivières qui débordent dans les vallées et les sédiments qui se déposent au fond des océans. Tous ces dépôts déterminent un piégeage du carbone pour une durée indéterminée dans le paysage de telle sorte que certains auteurs pensent que l'érosion peut, dans certains cas, améliorer la séquestration du carbone si celui-ci est mieux protégé dans les sédiments piégés que dans l'horizon humifère du sol. Entre le moment où les agrégats sont détruits par la battance des pluies ou arrachés par l'énergie du ruissellement, et le moment où ils sont piégés, on ignore la proportion du carbone du sol qui est minéralisé et libéré dans l'atmosphère. Lal (2003) estime que 20% du carbone érodé qui quitte la parcelle avec le ruissellement est minéralisé avant d'atteindre sa destination finale : par conséquent la lutte antiérosive devrait permettre dans une certaine mesure de maintenir dans le sol une fraction non négligeable de carbone (1.2 Gt C/an d'après Lal, 2003). Nous ne disposons pas encore de confirmation de cette estimation ; par contre nous allons présenter une synthèse de nos résultats sur l'érosion du carbone en 14 sites en milieux tropicaux et méditerranéens francophones.

1.2. Rôles de l'érosion

Les processus d'érosion comprennent trois phases : arrachement, transport et dépôt (Roose, 1996).

L'arrachement des mottes et leur fractionnement en agrégats ou en particules élémentaires par l'énergie de la battance des pluies et du ruissellement (ou de la gravité), ou par éclatement des agrégats lors de l'humectation, entraîne le désenclavement des matières organiques piégées dans les agrégats, une meilleure diffusion de l'oxygène autour des particules de sol et une accélération probable de la minéralisation des matières organiques du sol (Lal, 2003). L'érosion de ces particules et des matières organiques liées diminue le stock de carbone des horizons superficiels les plus riches en humus (Wan & El-Swaifi, 1997), et réduit ainsi localement la séquestration du carbone par un système de production donné.

Le transport des particules arrachées ne peut s'effectuer sans un fluide dont la « compétence » permet de mobiliser des particules de taille ou de poids donné et dont la « capacité » est suffisante pour déplacer des charges totales fonction de la vitesse du fluide. Durant ce transport, certains agrégats peuvent être détruits et les matières organiques, protégées dans ces agrégats, peuvent être minéralisées plus vite que dans les sols en place.

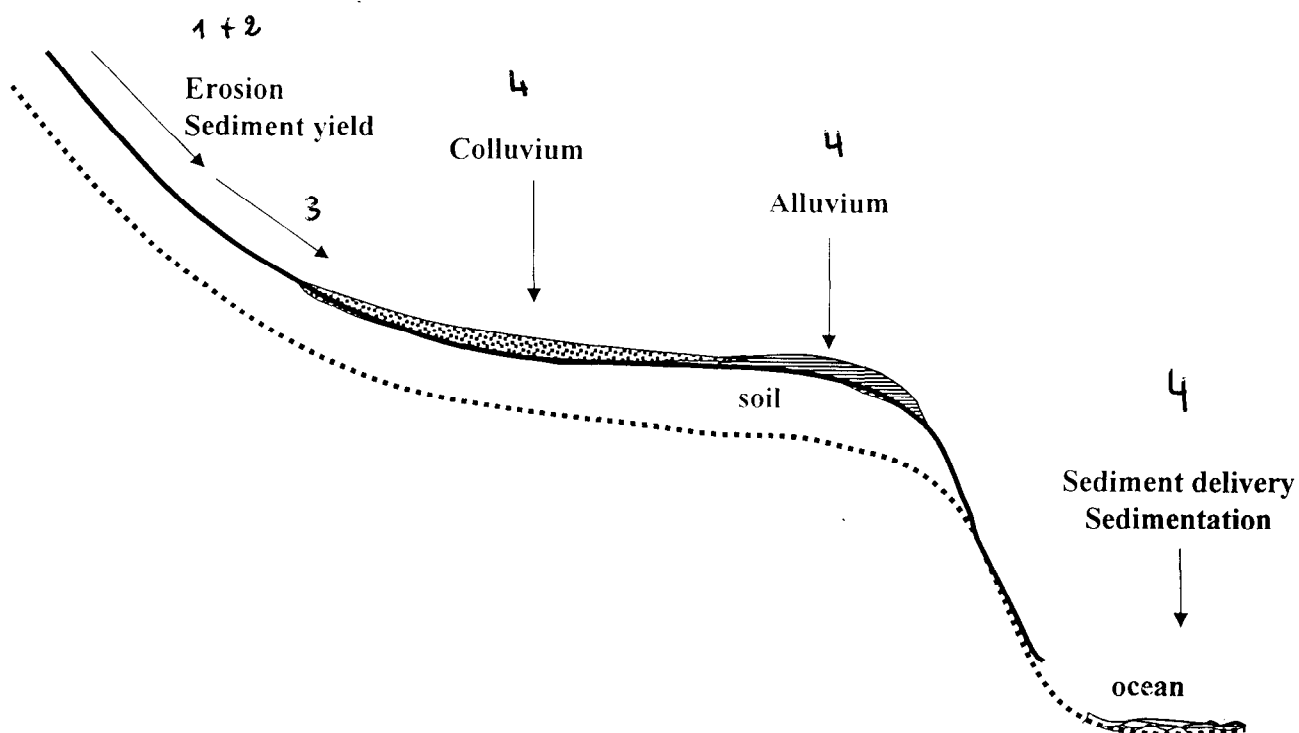
On manque de données sur l'importance des pertes gazeuses tout au long du trajet.

Dès que la pente diminue ou que la rugosité du milieu augmente, la vitesse du fluide et sa compétence diminuent et on observe des dépôts en bas des versants concaves (colluvions), dans les tourbières/prairies ou dans les plaines de débordement des rivières (alluvions), et finalement au fond de l'océan (sédimentation continentale) (fig. 2).

En absence de données, certains auteurs (Bernoux et al, 2004), font l'hypothèse que l'érosion ne fait que déplacer des matières organiques de la parcelle pour les redistribuer dans le bassin versant ou dans l'océan sans pour autant augmenter la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Pour d'autres, la circulation de l'humus entraîne la dissolution des silicates et des carbonates des roches et la production de gaz à effets de serre (Meybeck, 2002 ; Probst, 2002) : pour eux l'érosion géologique augmente la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère et participe ainsi au réchauffement général de l'atmosphère.

La lutte antiérosive par la gestion de la biomasse à la surface du sol pourrait donc entraîner trois bénéfices : la protection des sols contre l'érosion, l'apport de carbone dans les horizons de surface et l'amélioration des propriétés physiques (infiltration et agrégation), chimiques (stockage des nutriments) et biologiques (biodiversité de la faune et de la microflore) des horizons superficiels, les plus concernés par l'érosion en nappe.

Figure 2. Processus d'érosion et séquestration du carbone.



1. Dégradation des agrégats → minéralisation accélérée des matières organiques du sol
2. L'humus érodé accélère la dissolution des silicates, des carbonates et des MO des roches
3. Transfert du carbone sous forme particulaire (POC) et sous forme dissoute (DOC)
4. Séquestration du C dans les colluvions, les alluvions et l'océan.

1.3. Influence des processus sur la sélectivité de l'érosion du carbone

Dans le cadre de *l'érosion en nappe*, la battance des pluies sépare les particules des agrégats, mais l'énergie du ruissellement en nappe est limitée au déplacement sélectif des particules légères, matières organiques, argile et limons (Roose, 1977, 1980, 1996). Les sables sont projetés dans toutes les directions et ne peuvent progresser vers le bas des versants que par la battance et par le ruissellement turbulent dans les rigoles. L'érosion en nappe est donc sélective ainsi que les dépôts qui se produisent dès que le fluide est ralenti par la végétation, la rugosité de la surface du sol labouré ou par un mulch ou suite à la réduction de la pente.

Il existe quelques cas où l'érosion en nappe est peu ou pas sélective : il s'agit de sols très riches en argile (+limons fins) et matières organiques sur une épaisseur importante, par exemple les Nitisols de Martinique (Khamsouk, 2001 ; Blanchart et al., 2004), les sols volcaniques (De Noni et al., 2001 ; Rodriguez et al, 2004), certains Vertisols calciques d'Algérie sur forte pente (Arabi, 1991 ; Arabi et Roose, 2004 ; Morsli et al., 2004) ou au Mali sur glaciais à pentes faibles (Diallo et al, 2004), des ferralsols du Brésil (Brunet et al., 2004) et du Kenya (Boye et Albrecht, 2004).

L'érosion linéaire décape l'horizon humifère sans aucune sélectivité, mais par contre le dépôt des particules est sélectif : d'abord les graviers les plus grossiers dans les cônes de déjection de bas de pente, puis les sables dans les colluvions du bas des versants et enfin les particules fines dans zones humides des bords de rivières (alluvions) (Roose, 1996).

L'érosion en masse, par exemple l'érosion aratoire, arrache et dépose les matières sans sélectivité (Revel et al., 1990 ; Roose, 1996).

Dans cette étude, faisant le point sur des travaux de thèses anciennes ou récentes, nous présentons les résultats (54) de mesure de l'érosion en nappe et rigole de terre et de carbone à l'échelle des parcelles (100 à 1000 m²) situées sur des versants réguliers de 1 à 65 % de pente en 14 sites d'Afrique et de Martinique.

2. Méthodes de mesure de l'érosion

La méthode de mesure de l'érosion n'est pas indifférente aux processus concernés par le transport du carbone du sol : c'est pourquoi il nous faut justifier notre choix de technique et d'échelle de mesure.

Les **simulateurs de pluies sur 1 m²** sont nombreux (Hudson, 1993 ; Meyer, 1960 ; Asseline et Valentin, 1977) et permettent une approche valable de la dynamique du ruissellement au cours d'une série d'averses en un lieu donné (Lelong et al., 1993). Par contre, les transports solides effectués par ce ruissellement ne représentent qu'une partie des risques d'érosion en un point car sur un mètre les eaux de ruissellement ne peuvent développer suffisamment d'énergie pour creuser des rigoles, processus majeur sur des parcelles de 100 m² et les champs cultivés ordinaires (Asseline et Valentin, 1979). De plus, les risques d'effets de bordure sur l'érosion sont importants ainsi que le piégeage des particules détachées dans les irrégularités de la surface (flaques, rugosité du labour, souches et trous creusés par la faune). Le taux de carbone des sédiments reflète donc exclusivement la surface du sol sans rapport avec les horizons plus profonds et généralement plus pauvres en carbone, concernés par les rigoles. Par conséquent, le taux d'enrichissement en carbone est généralement plus élevé sur 1m² que dans les champs, sauf dans les cas particuliers où l'érosion ne se manifeste que sous forme d'érosion en nappe sans rigole, sous pâturage sur sol argileux (Brunet et Brossard, 2004). Les résultats des pertes de carbone par érosion sur micro-parcelles de 1m² sous pluies naturelles, ou à plus forte raison sous pluies simulées (couvrant mal la diversité des situations d'humidité préalable du sol), ne donnent qu'un premier aperçu des processus de détachement par la battance des pluies (sorte de grand test de stabilité structurale de la surface du sol). Ils ne sont relatés dans cet ouvrage que pour analyser les processus à leur origine et pour

confirmer dans l'espace les processus étudiés plus globalement sur parcelles d'érosion (Boye et Albrecht, 2004 ; Brunet et al., 2004 ; Chaplot et al., 2004).

Les capteurs de Gerlach sont de simples pièges de 0,5 à 1 m de large destinés à prélever une fraction du ruissellement en nappe et des éléments solubles ou solides transportés en un point donné d'un versant. Ils consistent essentiellement en une goulotte et un petit récipient qui permet de déterminer à partir de quelle hauteur de pluie commence le ruissellement (P_i = pluie d'imbibition) et la qualité des eaux de ruissellement. La portion de versant n'étant pas limitée on réduit les risques d'effets de bordure, mais on ignore la surface de drainage et on ne peut évaluer l'érosion par unité de surface (Planchon, 1991). Ce dispositif n'est intéressant que là où le ruissellement est uniformément en nappe (pas de rigole), et où il y a de nombreuses petites pluies, car il déborde dès qu'on observe de grosses averses, les plus érosives. Avec ce dispositif, on peut également s'attendre à un biais du coefficient de sélectivité du carbone (CER très élevé) car on n'observe correctement que les petites averses qui provoquent rarement des rigoles (Roose, 2002a).

Les parcelles d'érosion (runoff plots) de 50 à 1000 m². Chaque parcelle isolée fonctionne comme un petit bassin versant représentant un seul traitement, un sol, une pente, un système de production végétal. Au bas de cette parcelle isolée par des tôles fichées en terre, un canal capte le ruissellement et sa charge solide. Une première fosse permet d'isoler les terres de fond (TDF), c'est-à-dire les sédiments grossiers tractés à la surface du sol qui sédimentent rapidement dans la fosse : il s'agit d'agrégats, litières, graviers et sables grossiers susceptibles de se déposer dès que le ruissellement est freiné par une végétation plus dense ou une pente plus douce. Deux cuves de stockage reliées à la première par des partiteurs permettent d'évaluer le volume ruisselé et les suspensions fines (MES) lors des averses d'importance croissante. Ce dispositif étant standardisé (Wischmeier & Smith, 1978 ; Roose, 1977 et 2002a), de même que sa gestion et le traitement des données (pluie, ruissellement, MES et TDF), il procure des données comparatives fiables de l'érosion en nappe et rigoles relatives à une fraction de versant : il nous servira de base pour évaluer les pertes de carbone de la couverture pédologique en fonction des systèmes de gestion des terres (= sediment yield). On distinguera le carbone organique particulaire (solide ou POC) observé dans les MES + TDF et le carbone organique dissout (DOC) dans les eaux de ruissellement et de drainage (lysimètres).

Les lacs collinaires sur des bassins couvrant plusieurs km². Dans certaines zones semi-arides, les retenues collinaires se dessèchent pendant quelques mois de l'année ce qui permet d'évaluer les transports solides à l'échelle d'un petit bassin versant intégrant la production de sédiments par érosion en nappe, rigoles et ravines, dégradation des berges et approfondissement du lit des rivières, mais aussi les dépôts colluvionnaires de bas de pente (= sediment delivery) (Albergel et al., 2004).

Si cette approche permet une meilleure estimation des transports solides jusqu'au premier barrage, il ne permet pas de définir l'origine des sédiments, ni les facteurs d'érosion (variables tout au long de la toposéquence), ni donc les méthodes de lutte appropriées. Au niveau de la méthodologie, le point délicat se situe au niveau du prélèvement d'échantillons de sédiments représentatifs vu le dépôt très sélectif des matériaux érodés devant le barrage : galets dans le cône de déjection à l'entrée du lac, sables ensuite et vases sur l'ensemble de la surface de stockage des eaux.

Les lysimètres. En quelques stations (Abidjan, Azaguié, Bouaké et Korhogo en Côte d'Ivoire, Saria et Gonsé au Burkina, Mbissiri au Cameroun, Rivière Lézarde en Martinique) les eaux de drainage ont été collectées chaque semaine vers 50 à 100 cm de profondeur dans des lysimètres cylindriques en tôle de 63 cm de diamètre, non remaniés (Roose et Henry des Tureaux, 1970). Il s'agit des écoulements naturels rapides et lents (en 2 à 6 jours) correspondant aux macro-pores et en partie aux micro-pores.

Les analyses. Les terres de fond (TDF) ont été séchées à l'étuve ventilée à 40 °C. Les suspensions et solutions ont été prélevées dans des flacons plastiques de 1 à 10 litres, floculées par addition de 1 ml/litre d'une solution de sulfate d'alumine à 50 g/litre ; le surnageant a servi pour déterminer le C dissout (DOC) ; le culot a été séché à l'étuve ventilée à 40 degrés et constitue la MES. La teneur en POC a été déterminée sur TDF et MES par combustion sèche avec un analyseur élémentaire (CHN Fisons Na 2000N Protein).

Après floculation par une solution de sulfate d'alumine à 50 g/litre et filtration après stockage au frigo, le carbone soluble organique et minéral ont été déterminés à l'analyseur Shimadzu TOC 5000. En Algérie, le carbone particulaire des sédiments et du sol en place a été déterminé par la méthode de Anne au laboratoire de l'INRF (Institut National de Recherches Forestières de Bainem, près d'Alger).

En conclusion, pour évaluer la dynamique actuelle des sols et du carbone organique, nous avons choisi la mesure de l'érosion en nappe et rigole représentative des sols de versants à l'échelle de parcelles standardisées de 100 à 1000 m². Chacune d'elles représente des conditions agro-écologiques représentatives : un sol, une pente, une végétation, un système d'exploitation. Par ailleurs les observations ont été prolongées sur 1 à 10 ans pour aborder l'hétérogénéité temporelle (50 à 200 pluies) sur une séquence bio-climatique couvrant le matorral surpâturés des montagnes méditerranéennes du Nord Ouest de l'Algérie, des forêts denses aux savanes d'Afrique occidentale, la savane soudanienne du Nord Cameroun. Par contre le dosage du carbone n'a été réalisé que sur 1 à 5 années, en fin d'expérience, vu le coût des opérations. Les échantillons de sols ont été prélevés au tube sur 10 cm (échantillons composite de 3 à 12 prises) au début et souvent en fin d'expérimentation, ce qui augmente la dispersion des données calculées de CER.

3. Situations étudiées en milieux tropicaux et méditerranéens

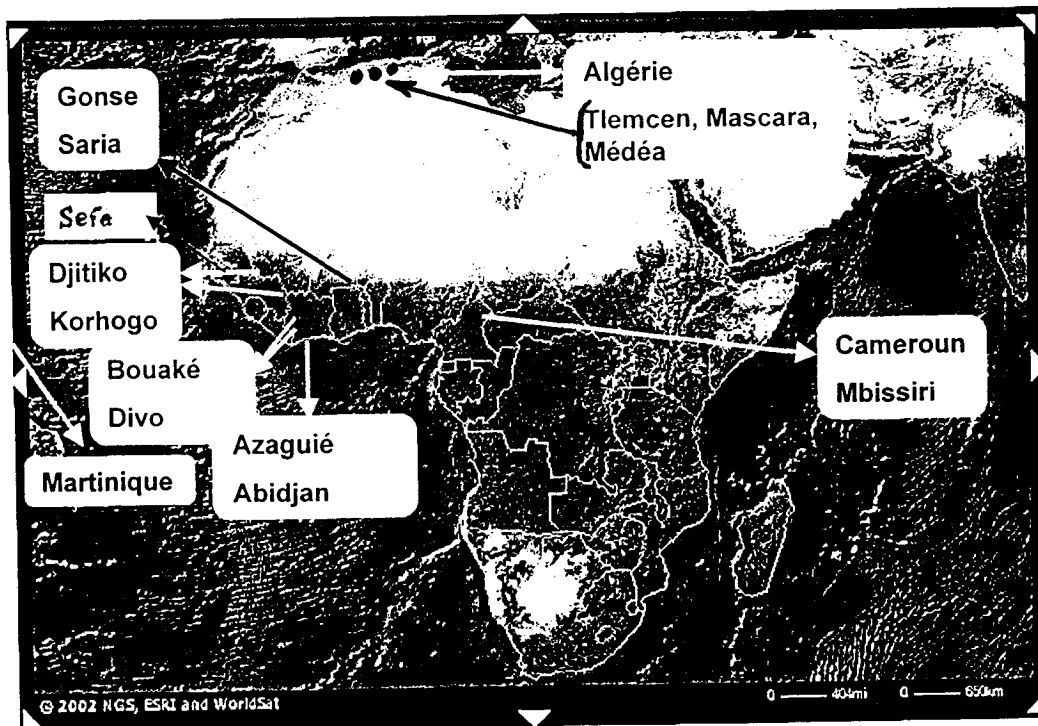
Les parcelles d'érosion dont il est question dans cette note ont été disposées en cinq zones (voir carte fig.3).

- **En Afrique du Nord** sur les montagnes moyennes méditerranéennes du Nord Ouest de l'Algérie, avec des pluies peu agressives en général (300 à 600 mm/an) mais de violents orages dévastateurs à la transition de l'été brûlant à l'automne, ou des pluies saturantes au printemps, sur des sols bruns calcaires, des sols rouges Fersiallitiques fragiles, des Vertisols gris et des Lithosols d'autant plus résistants à l'agressivité des pluies (erratiques) qu'ils sont riches en argiles, saturés en calcium et caillouteux en surface : stations de Médéa, Mascara et Tlemcen (Arabi, 1991 ; Morsli et al., 2002 ; Mazour et al., 2002 ; Morsli, Mazour et al., 2004).
- **En Afrique de l'Ouest humide** sur des sols ferrallitiques acides, très perméables, dans des paysages forestiers en demi-orange, à fortes pentes avec des pluies abondantes (>1500 mm) donnant un drainage important (40 à 60% des pluies) pendant la majeure partie de l'année (Adiopodoumé près d'Abidjan sur sables tertiaires, Azaguié sur schistes, Divo sur granite) (Roose, 1981).
- **En Afrique de l'Ouest semi-humide** sur des sols ferrallitiques ou ferrugineux lessivés sur de longs glacis cuirassés au sommet et des sols bruns vertiques alluviaux dans la plaine, dans des paysages soudaniens ou soudano-sahéliens de savanes

avec des pluies agressives concentrées sur quelques mois (1300 à 700 mm/an) : Bouaké et Korhogo sur granite au Centre ou Nord Côte d'Ivoire, Djitiko au Sud Mali sur schistes micassés et granite, Saria et Gonsé sur granite au centre du plateau Mossi au Burkina, Séfa sur granite en Casamance au Sénégal .

- **En Afrique centrale**, sur des sols ferrugineux sableux de la plaine soudanienne du Nord Cameroun (Mbissiri) .
- **En Martinique** sur un Nitisol très argileux et très acide sur cendres volcaniques avec des pentes variant de 10 à 40 %.

Figure 3. Carte de situation des 14 stations de mesure



4. Résultats

La majorité des données sur l'érosion et les pertes en carbone sur parcelles d'érosion proviennent des thèses de Roose en Afrique de l'Ouest (1977, 1980), Arabi en Algérie (1991), Boli au Cameroun (1996), Diallo au Mali (2000), Khamsouk en Martinique (2001) et de résultats récents publiés au cours de ce colloque (Morsli, Mazour et al., 2004, en Algérie ; Bep et al, au Cameroun, 2004). On trouvera au tableau 1 un résumé des résultats.

4.1. Les pertes en terre sur parcelle (tableau 1)

Les pertes en terre au bas d'une parcelle de 100 m² varient de 40 à 1000 kg /ha/an sous végétation naturelle non dégradée ou cultures paillées, à plus de 100 000 kg/ha/an sous cultures sarclées sur pente moyenne, à plus de 200 000 kg/ha/an sur sol dénudé, sur pentes fortes (>20 %) et sous climat humide (pluie >2000 mm/an). En zone méditerranéenne, les pertes en terre mesurées sur parcelles ont toujours été très faible (0.05 à 20 t/ha/an) par rapport aux situations semblables en milieu tropical car les pluies sont moins agressives et les sols plus résistants. Par contre, nous n'avons jamais observé plus de 700 t/ha/an, même sur des pentes très fortes (plus de 60%), car les processus évoluent de l'érosion en nappe par battance des pluies à l'érosion linéaire dépendant du ruissellement (rigoles) et aux glissements en masse (érosion aratoire et creeping), les sols sont plus résistants, plus riches en cailloux et en argile, en fer ou alumine libres ou en carbonates.

4.2. L'érosion du carbone (tableau 1)

Les pertes en carbone à l'échelle de la parcelle sur un versant dépendent avant tout du poids de terre érodé, puis de la richesse en carbone des couches superficielles du sol (mélangées par le labour) et des processus d'érosion en fonction du type de milieu.

Au tableau 1 et figures 4 et 6, on peut distinguer trois milieux (Roose, 2002b):

- **les milieux bien couverts de litière** (les forêts et savanes protégées des feux et du surpâturage, l'arboriculture avec plantes de couverture). L'énergie des pluies et du ruissellement étant dispersée par la litière, les pertes en terre sont faibles, mais très sélectives et les pertes en carbone réduites à 0.1 à 50 kg C/ha/an.
- **les sols cultivés sarclés après labour, et les parcours surpâturés, partiellement couverts**, sont soumis à une forte érosion en nappe et rigole, une sélectivité réduite et une perte de carbone variant de 50 à 350 kg C/ha/an.
- **les terres nues sur pentes fortes** connaissent une très forte érosion peu sélective et des pertes en carbone variant de 300 à 3000 kg C/ha/an.

Tableau 2. Carbone érodé en fonction du C du sol, de l'érosion et du produit de l'érosion par le taux de C du sol (sur 10 cm).

Explication du C érodé	par C du sol	par l'érosion	par Erosion x C sol
avec 54 points	$r = 0.157$ ^{NS}	$r = 0.979$ ***	$r = 0.975$ ***
en excluant 4 points où C érodé > 1000 kg C/ha/an	$r = 0.409$ **	$r = 0.631$ ***	$r = 0.739$ ***
en excluant 8 points avec C érodé > 200 kg C/ ha/an	$r = 0.116$ ^{NS}	$r = 0.633$ ***	$r = 0.895$ ***

Tableau 1. Caractéristiques des 54 stations expérimentales et résultats des mesures de l'érosion, de l'érosion du carbone et de l'indice de sélectivité (CER).

Stations	Mode d'occupation	Pluie mm an ⁻¹	Pente %	Altitude m	Type de sol	Cailloux %	Argile g kg ⁻¹ sol	C sol < 2 mm	Erosion t ha ⁻¹ an ⁻¹	C érodé kg ha ⁻¹ an ⁻¹	CER	Années de mesure
¹ Riv. Léz. Mart.	sol nu travaillé	2220	10	70	brun rouille à halloysite	0	68	15,1	85,8	1249	1,0	2
¹ Riv. Léz. Mart.	ananas sur billons	2220	10	70	brun rouille à halloysite	0	68	16,2	17,2	294	1,1	2
¹ Riv. Léz. Mart.	banane sur paillis	2220	10	70	brun rouille à halloysite	0	68	17,9	0,5	12	1,5	2
¹ Riv. Léz. Mart.	canne sur paillis	2220	10	70	brun rouille à halloysite	0	68	16,5	0,1	2	1,7	2
¹ Riv. Léz. Mart.	ananas à plat sur paillis	2220	10	70	brun rouille à halloysite	0	68	16,7	0,0	1	2,1	2
¹ Riv. Léz. Mart.	sol nu travaillé	2220	25	70	brun rouille à halloysite	0	68	17,0	127,5	2274	1,0	2
¹ Riv. Léz. Mart.	sol nu travaillé	2220	40	70	brun rouille à halloysite	0	68	18,8	147,4	2999	1,1	2
² Adiopo. CI	maïs	1900	7	30	ferrallitique sur sables	0	11	10,8	99,1	1982	1,9	2
² Adiopo. CI	forêt	1800	11	30	ferrallitique sur sables	0	13	18,6	0,1	13	14,0	10
² Adiopo. CI	forêt	1800	65	30	ferrallitique sur sables	0	15	21,8	0,5	42	4,3	10
³ Azaguié CI	forêt	1640	14	80	ferrallitique désaturé /Sch	0	13	11,3	0,2	12	7,0	7
³ Azaguié CI	banane	1640	14	80	ferrallitique désaturé /Sch	0	15	19,1	1,8	105	3,0	7
⁴ Divo CI	forêt	1400	10	< 100	ferrall peu désaturé /G	0	26	12,4	0,1	8	4,9	7
⁵ Korhogo CI	savane arbustive (brûlée)	1280	3	390	ferrallitique rajeuni /G	69	16	15,8	0,1	5	3,4	8
⁵ Korhogo CI	maïs	1280	3	390	ferrallitique rajeuni /G	69	16	8,1	5,4	63	1,5	8
⁶ Sefa Sénégal	arachide, riz, sorgho	1200	2	< 50	ferrugineux lessivé /G	0	10	4,6	9,3	73	1,7	9
⁷ Bouaké CI	savane arborée	1200	4	370	ferrallitique rajeuni /G	15	6	15,8	0,1	2	2,6	4
⁸ Djitiko Mali	vieille jachère	1080	2	350	ferrugineux lessivé /G	0	25	11,0	4,8	125	2,4	1
⁸ Djitiko Mali	maïs-coton labour	1080	2	350	ferrugineux lessivé /G	0	25	6,9	18,4	330	2,6	1
⁸ Djitiko Mali	maïs-coton semis direct	1080	2	350	ferrugineux lessivé /G	0	25	8,9	7,4	154	2,3	1
⁸ Djitiko Mali	vieille jachère	1080	2	350	brun vertique /Sch	0	26	38,4	1,7	190	2,9	1
⁸ Djitiko Mali	maïs-coton labour	1080	2	350	brun vertique /Sch	0	26	38,1	14,1	280	0,5	1
⁸ Djitiko Mali	maïs-coton semis direct	1080	2	350	brun vertique /Sch	0	26	40,5	6,0	358	1,5	1
⁹ Mbissiri Cam.	coton labour	860	2	370	ferrug. sableux /g	0	7	3,5	8,7	90	3,0	1
⁹ Mbissiri Cam.	idem avec fumier	860	2	370	ferrug. sableux /g	0	7	3,0	12,2	111	3,0	1
⁹ Mbissiri Cam.	coton travail réduit	860	2	370	ferrug. sableux /g	0	7	5,0	6,0	57	1,9	1
⁹ Mbissiri Cam.	coton labour, dégradé	860	2,5	370	ferrug. sableux /g	0	8	3,0	40,4	160	1,3	1
⁹ Mbissiri Cam.	idem avec fumier	860	2,5	370	ferrug. sableux /g	0	8	3,0	15,2	85	1,9	1
⁹ Mbissiri Cam.	coton travail réduit, dégradé	860	2,5	370	ferrug. sableux /g	0	8	3,0	2,4	12	1,8	1
¹⁰ Gonsé BF	savane arbustive brûlée	700	0,5	300	ferrugineux lessivé /G	0	8	5,5	0,2	9	10,7	6
¹¹ Saria BF	jachère jeune herbacée	640	0,7	300	ferrug. lessivé cuirassé /G	0	13	4,7	0,5	9	3,6	3
¹² Médéa Alg.	céréales amélioré	550	14	900	brun vertique	4	64	5,2	0,0	0	1,8	5
¹² Médéa Alg.	céréale-légumineuse	550	14	900	brun vertique	4	65	6,8	0,0	0	1,3	5
¹² Médéa Alg.	matorral arbustif	550	40	900	brun calcaire	16	43	9,6	0,1	1	2,1	5
¹² Médéa Alg.	matorral arbustif réenherbé	550	40	900	brun calcaire	16	50	7,1	0,0	0	3,1	5
¹² Médéa Alg.	arboriculture sur sol nu	550	35	900	rouge fersiallitique	0	51	7,1	1,4	16	1,6	5
¹² Médéa Alg.	vigne avec blé-légumineuse	550	35	900	brun calcaire colluvial	20	39	8,2	0,1	1	1,2	5
¹³ Mascara Alg.	parcours	470	20	640	brun calcaire limoneux	0	17	10,2	1,6	42	2,5	1
¹³ Mascara Alg.	blé	470	20	640	brun calcaire limoneux	0	17	10,3	0,8	22	2,7	1
¹³ Mascara Alg.	sol nu travaillé	470	20	640	brun calcaire limoneux	0	17	10,0	8,5	136	1,6	1
¹³ Mascara Alg.	jachère en défens	470	20	640	brun calcaire limoneux	0	17	12,3	0,5	24	3,9	1
¹³ Mascara Alg.	parcours	470	40	670	brun vertique	0	57	11,3	1,2	31	2,3	1
¹³ Mascara Alg.	blé	470	40	670	brun vertique	0	57	11,6	1,1	25	2,0	1
¹³ Mascara Alg.	sol nu travaillé	470	40	670	brun vertique	0	57	10,2	6,8	95	1,4	1
¹³ Mascara Alg.	jachère en défens	470	40	670	brun vertique	0	57	12,3	0,6	21	2,8	1
¹³ Tlemcen Alg.	sol nu travaillé	450	21	450	brun calcaire limoneux	46	20	18,6	3,9	78	1,1	1
¹³ Tlemcen Alg.	parcours	450	21	450	brun calcaire limoneux	46	20	23,0	0,7	28	1,7	1
¹³ Tlemcen Alg.	jachère en défens	450	21	450	brun calcaire limoneux	46	20	33,3	0,7	34	1,4	1
¹³ Tlemcen Alg.	sol nu travaillé	420	15	450	brun vertique	7	50	8,0	1,8	19	1,3	1
¹³ Tlemcen Alg.	blé-parcours	420	15	450	brun vertique	7	50	9,3	1,6	27	1,8	1
¹³ Tlemcen Alg.	blé isohypse avec engrais	420	15	450	brun vertique	7	50	10,3	1,6	33	2,0	1
¹³ Tlemcen Alg.	sol nu travaillé	360	10	450	rouge fersiallitique /g	42	37	6,3	3,2	31	1,6	1
¹³ Tlemcen Alg.	parcours	360	10	450	rouge fersiallitique /g	42	37	6,8	1,8	26	2,1	1
¹³ Tlemcen Alg.	jachère en défens	360	10	450	rouge fersiallitique /g	42	37	9,4	1,0	18	1,9	1

¹Khamsouk (2001), Blanchart et al. (2004) ; ²Roose (1970) ; ³Roose et Godefroy (1977) ; ⁴Roose (1980) ; ⁵Roose (1979) ; ⁶Roose (1967) ; ⁷Roose et Bertrand (1972) ; ⁸Diallo et al. (2004) ; ⁹Boli (1996), Bep A Ziem et al. (2004) ; ¹⁰Roose (1980a) ; ¹¹Roose (1980b) ; ¹²Arabi (1991, 2004) ; ¹³Morsli et al. (2004)

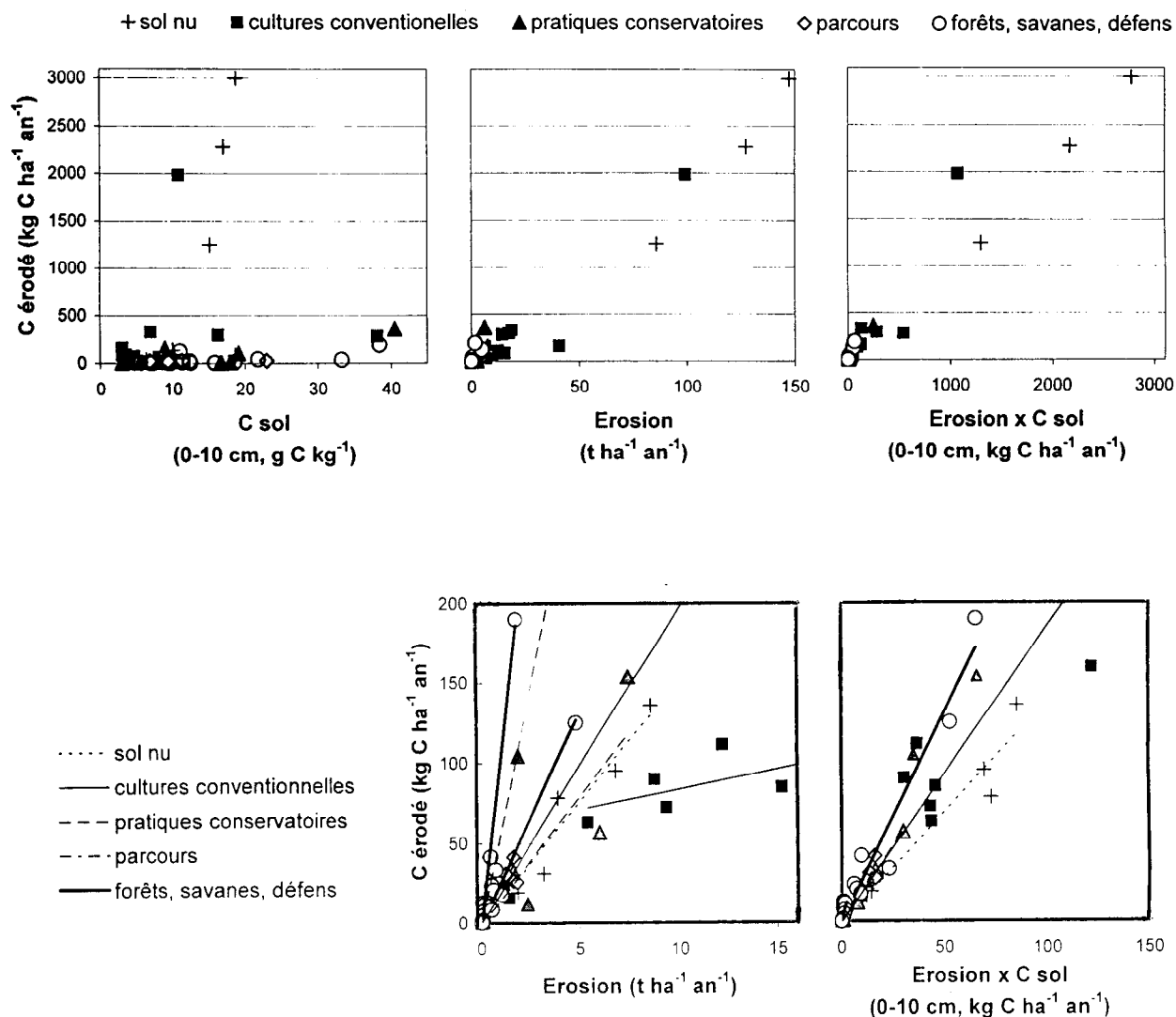
Abréviations

Stations : Riv. Léz. Mart. Rivière Lézarde Martinique ; Adiopo. Adiopodoumé ; CI Côte d'Ivoire ; Cam. Cameroun ; BF Burkina Faso ; Alg. Algérie

Substrat géologique : /G sur granite ; /Sch sur schiste ; /g sur grès

C carbone ; C sol teneur en C de la couche de sol 0-10 cm ; C sédiments teneur en C des sédiments ; CER coefficient d'enrichissement en C des sédiments (par rapport à la couche de sol 0-10 cm)

Figure 4. Poids de carbone érodé (POC) en fonction du taux de carbone du sol, des pertes en terre (érosion en t/ha/an) et du produit de l'érosion par la teneur en carbone du sol.

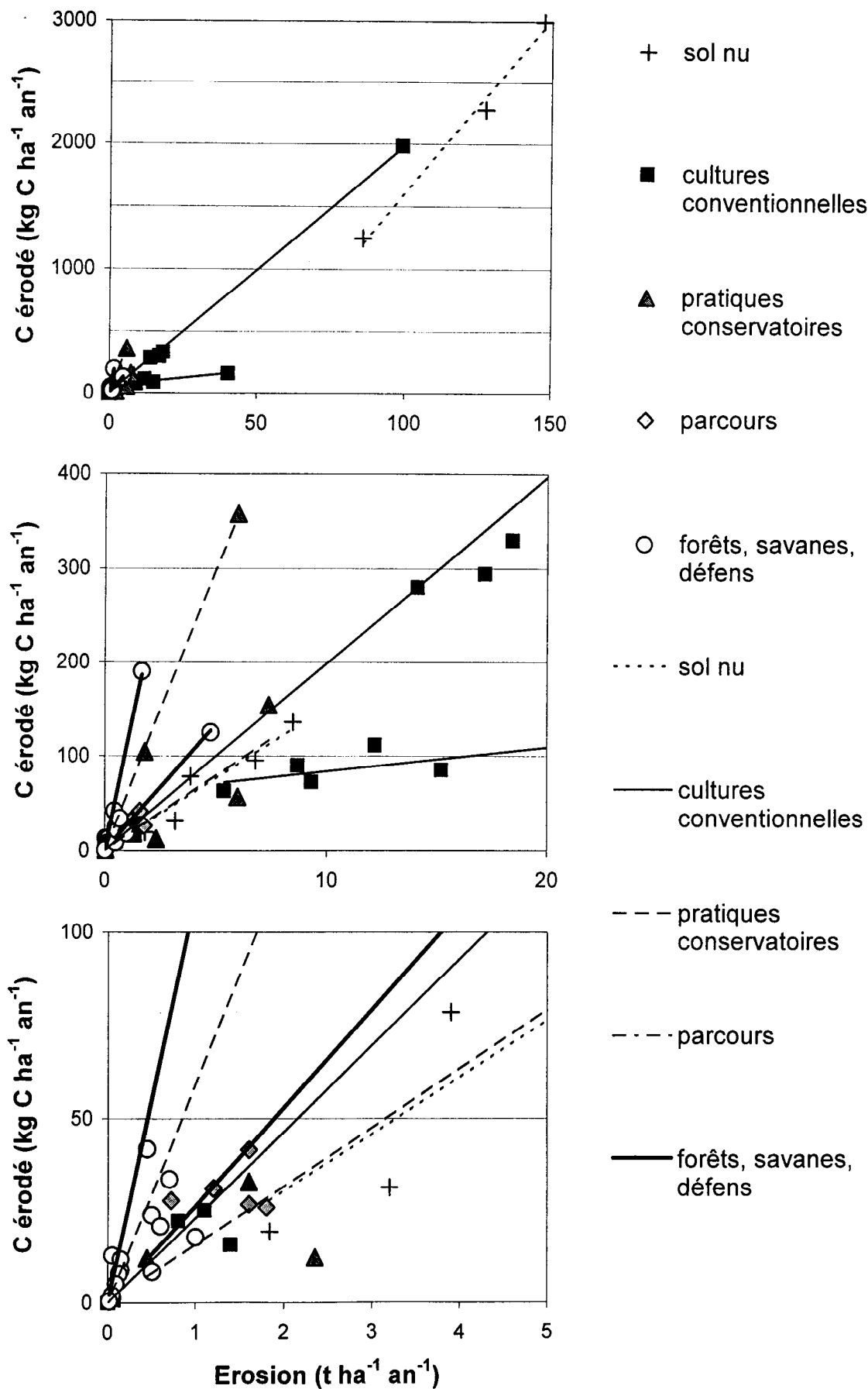


Au tableau 2 et à la figure 4, on observe que le poids de carbone érodé est peu lié à la teneur en carbone de l'horizon superficiel, bien lié aux pertes en terre et encore mieux au produit des pertes en terres par le taux de carbone du sol (sur 10 cm), surtout pour les valeurs de carbone érodé <200 kg.

On note que 4 points à forte érosion améliorent considérablement la régression ($C \text{ érodé} = f \text{ érosion}$). Par contre, si on explore surtout le domaine des érosions faibles et moyennes ($C \text{ érodé} < 200 \text{ kg/ha/an}$), on s'aperçoit que le produit de l'érosion par le taux de carbone du sol améliore nettement la régression.

A la figure 5, on a comparé à 3 échelles le carbone érodé en fonction des pertes en terre pour 5 utilisations des terres. A la figure 6, on peut conclure que les CER médians des terres fortement anthropisées (cultures protégées ou pas et parcours surpâturés) sont très voisins : on distingue donc nettement les trois milieux présentés : les sols nus, les sols couverts et les sols fortement anthropisés intermédiaires.

Figure 5. Carbone érodé à 3 échelles, en fonction des pertes en terre (érosion en t/ha/an) sous diverses utilisations des sols.



4.3. L'indice de sélectivité de l'érosion pour le carbone (CER) (fig.6)

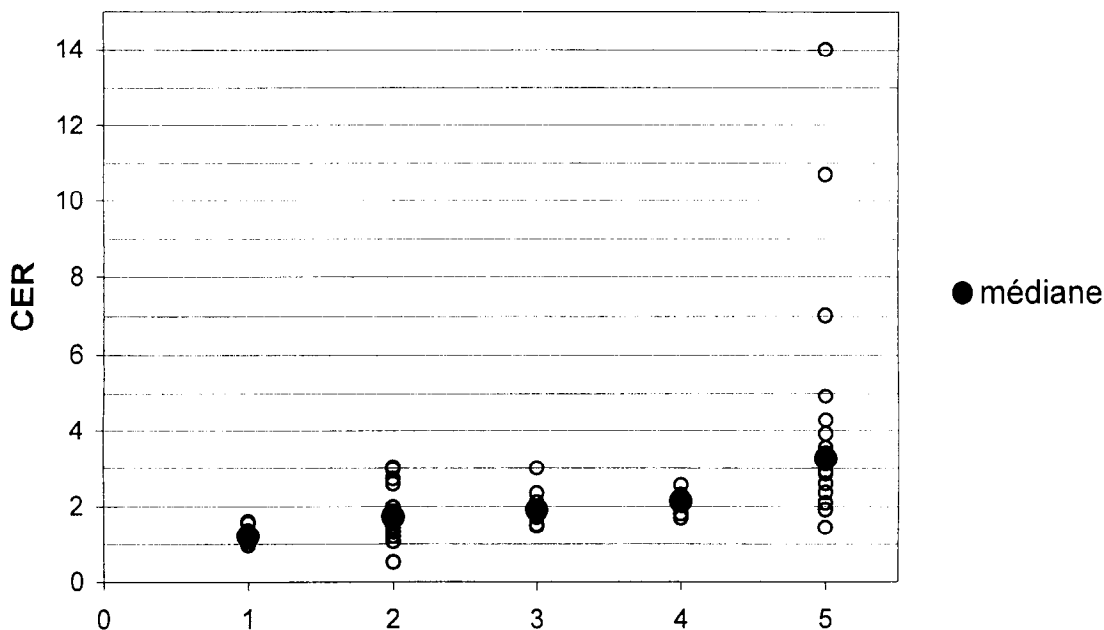
L'indice de sélectivité de l'érosion se définit généralement comme le rapport entre le taux d'argile (ou de carbone) de l'ensemble des sédiments érodés (terres de fond + matières en suspension) et celui de l'horizon superficiel du sol avant érosion (sur 10 cm = horizon labouré en culture manuelle ou en traction animale en Afrique). Pour le carbone (Carbon Enrichment Ratio) le CER a varié de <0.5 à 14 sur l'ensemble de nos stations.

Il varie de 2.5 à 14 (Md = 3.3) sur les milieux bien couverts par une litière (forêts, savanes et vieille jachères protégées, plantes de couverture).

Il varie de 0.5 à 1.6 (Md = 1.2) sur les parcelles très mal couvertes, les jachères nues travaillées, les fortes pentes exposées à l'érosion en rigole ou en masse (érosion aratoire).

La médiane du CER sous culture sarclée conventionnelle est de 1.7, sous culture protégée par CES, CER Md = 1.9 et sous parcours CER Md = 2.1. Presque toutes les situations étudiées ont confirmé l'existence d'une certaine sélectivité des processus d'érosion observés sur parcelles en milieu naturel de pente variant de 0.5 à 65%, sur des sols sablo-limono-argileux (de 5 à 30 % d'argile), mais surtout sur les sols sablo-limoneux, dans des climats hyper-humides tropicaux à semi-arides méditerranéens, sous des couverts végétaux très variables de densité, hauteur, architecture. Seuls les sols très argileux volcaniques très bien structurés (Nitisols) ou les Vertisols calciques et les Ferralsols très argileux perdent des sédiments agrégés, de même composition que l'horizon superficiel (ou même moins riche si le labour a enfoui l'horizon humifère). Pour hiérarchiser les facteurs les plus importants, on a réuni à la figure 6, les données suivant les trois groupes de couvert présentés plus haut : on voit bien la dispersion des CER sous chacun des modes d'occupation des sols.

Figure 6. Coefficient de sélectivité de l'érosion du carbone (CER) en fonction du mode d'utilisation des sols.



Modes d'occupation des sols	CER Médiane
1. Sol nu	1.2
2. Cultures conventionnelles	1.7
3. Cultures avec pratiques conservatoires	1.9
4. Parcours pâturés	2.1
5. Forêts, savanes, et jachères en défens	3.3

5. Discussion : importance des paramètres modérateurs

On constate donc une forte variation de la production de sédiments sur les versants et une importance majeure du couvert végétal, de la pente et de l'érosivité des pluies sur les risques d'érosion. Comme l'érosion en nappe déplace d'abord la couche humifère, on peut s'attendre à une érosion sélective de ses composants les plus légers : les matières organiques et les argiles (Roose, 1977, 1980, 1996).

5.1. Les pertes en terre

Si on analyse l'importance des facteurs qui régissent l'érosion en nappe en Afrique selon le modèle USLE (Wischmeier et Smith, 1978 ; Roose, 1978, 1996), on trouve que :

- l'agressivité des pluies Rusa varie de 20 à > 1200 en tonnes métriques/ ha et cm de pluie ($E_{im} = 17,35 \text{ Rusa}$)
- le couvert végétal varie de 1 sur sol nu, 0,2 à 0.9 sous cultures et à 0.001 sous forêt ;
- le facteur topographique varie de 0.1 à 20 sur les versants généralement cultivés ;
- le facteur pédologique varie de 0.4 (sur cendres volcaniques et sols sodiques), 0.25 sur sols ferrugineux, 0,20 à 0.10 sur sols ferrallitiques, 0.01 sur lithosols gravillonnaires et à 0.001 (sur vertisols calciques) ; ($K_m = 1.292 \text{ Kusa}$) (Roose et Sarrailh, 1990);
- les techniques culturales antiérosives (labour ou billonnage isohypse) peuvent réduire l'érosion de 1 à 0.1, en fonction de la pente.

Plus le ruissellement et les pertes en terre sont modérés, plus l'érosion est sélective vis-à-vis des particules légères. Plus l'érosion est abondante, plus on observe du ruissellement et de l'érosion linéaire et plus le coefficient de sélectivité est faible : il peut passer sous la barre des 1 (théoriquement = décapage non sélectif) si l'érosion attaque des horizons appauvris en carbone par rapport au niveau de référence des dix premiers centimètres.

5.2. Les pertes de carbone par érosion à l'échelle d'une parcelle sur versant

Les pertes de carbone sont négligeables dans les milieux bien couverts (<50 kg/ha/an) où elles sont compensées facilement par les aérosols et surtout par l'apport de litière : elles ont peu d'influence sur le stock de matières organiques du sol (Roose, 1980 ; Blanchart et al., 2004). Par contre elles peuvent atteindre 0.1 à 3 tonnes de C/ha/an sur des sols cultivés mal couverts, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de la séquestration du carbone par la canne à sucre (Razafimbelo et al., 2003 ; Blanchart et al., 2004), les légumineuses (Lal, 1998 ; Moyo au Zimbabwe, 1998 ; Gachene et al., 1997 ; Barthès et al., 2004), les plantations forestières et les jachères arborées (Albrecht, Kandji, 2003 ; Boye et Albrecht, 2004) et certaines cultures industrielles comme la banane et les ananas avec paillage (Blanchart et al., 2004). On ne peut donc négliger les pertes par érosion quand on évalue la capacité de séquestrer du carbone dans le sol d'un système de production en comparant les stocks de carbone après quelques années (Feller et Beare, 1997 ; Bernoux et al., 2004).

Les pertes de carbone dépendent beaucoup des sources d'énergie et du type d'érosion. Lorsque l'érosion en nappe dépend essentiellement de l'énergie de la battance des gouttes de pluie, le ruissellement a une faible compétence et ne transporte que les particules légères : l'érosion sera fortement sélective vis-à-vis des argiles et limons fins (<50 microns) et a fortiori des matières organiques (faible densité). Par contre, lorsque l'érosion évolue principalement en rigole, l'énergie du ruissellement linéaire est capable de déplacer les sables, agrégats et petits graviers et la sélectivité de l'érosion diminue. L'érosion en masse (comme l'érosion aratoire ou le creeping fréquent sur fortes pentes) n'est pas sélective non plus.

Les pertes en carbone se présentent essentiellement sous forme solide /particulaire (POC) et liées aux terres de fond (Tdf) et suspensions (MES), mais lorsque l'érosion est abondante, le ruissellement l'est généralement également et les pertes de C dissout (DOC) peuvent atteindre 50 kg de carbone (sous cultures sarclées). Le lessivage de carbone dissout (DOC) dans les eaux de drainage peuvent atteindre 600 kg C/ha/an en zone humide abondamment couverte par la végétation forestière, donc peu érodées (ex Abidjan). On peut d'ailleurs observer une certaine compensation entre le carbone ruisselé et le C des eaux de drainage : si on défriche la végétation, le ruissellement augmente, mais généralement au détriment du drainage, tout au moins en zone tropicale humide. La définition du CER ne concerne que le carbone particulaire (POC) : ne faudrait-il pas ajouter le carbone soluble du ruissellement et du drainage (DOC) pour évaluer le taux de sélectivité des pertes et la dynamique du carbone?

L'érosion du carbone dépend beaucoup **du type de couvert végétal**.

Si le sol est couvert à 100% par une canopée située à 4 m d'altitude, l'érosion observée sera voisine de 75% de celle d'une jachère nue voisine (Wischmeier & Smith, 1978). Par contre si la couverture du sol se trouve au ras du sol (cas du paillis et lits de cailloux), l'érosion sera réduite à moins de 5% de celle d'une parcelle nue. En effet ce couvert dissipera non seulement l'énergie des gouttes de pluie, mais aussi celle du ruissellement (Roose, 1996).

5.3. Impact des paramètres modifiant l'érosion sélective du carbone

531. La texture des sols et la stabilité des agrégats

Plus les horizons superficiels des sols sont **argileux** et moins l'érosion en nappe est sélective : c'est mathématiquement vrai pour les particules fines ($<50 \mu$), mais aussi pour le carbone qui reste protégé à l'intérieur des agrégats. C'est le cas des Vertisols calciques d'Algérie (Arabi et Roose, 2004 ; Morsli et al., 2004), d'un Vertisol du Mali (Diallo et al., 2004), mais aussi des Nitisols de Martinique (Blanchart et al., 2004), des sols volcaniques (De Noni et al, 2001 ; Rodriguez et al., 2004), des nito-humic- Ferralsols argileux du Kenya (Boye & Albrecht, 2004) et d'un Ferralsol argileux du Brésil (Brunet et al., 2004). Dans ces sols argileux, riches en matières organiques (SOM), en carbonates et/ou en fer + alumine libres, la battance des pluies découpe des agrégats entiers qui sont emportés par le ruissellement par traction des filets d'eau circulants entre les touffes ou entre les mottes (Roose et al., 1999). La tendance naturelle de l'érosion est d'évoluer rapidement en rigole du fait d'un ruissellement concentré (Roose et al., 1999). Par contre, sur les sols sableux (Ferrugineux) ou limoneux (sols bruns calcaires ou alluviaux, ou ferrugineux), la battance fait éclater les agrégats et l'érosion en nappe disperse les particules du sol moins riche en humus par le ruissellement en nappe : seules les particules fines et légères circulent tandis que les sables forment des nappes de sable délavé ou de gravillons ferrugineux à la surface des parcelles peu couvertes. La sélection de l'érosion est alors forte vis-à-vis du carbone (Roose, 1980).

532. Le labour par contre augmente la battance, augmente le ruissellement et réduit le tri des particules. Le non labour ou semis direct sous litière réduit l'énergie de la battance et du ruissellement et augmente donc la sélectivité du transport des particules fines et légères (voir Martinique : CER augmente de 1 sur sol nu, 1,2 sous culture billonnée à 2- 7,9 sous cultures diverses avec paillage) (Blanchart et al., 2004).

533. L'effet du couvert végétal est plus nuancé en fonction de l'altitude de la canopée, de la présence de litière ou de cailloux à la surface du sol. Sous diverses prairies du Brésil, antérieurement labourées à deux reprises, l'indice de sélectivité reste modéré (1.1 à 1.9)

malgré un fort couvert végétal au moment des mesures (Brunet et al., 2004) : le ruissellement décape l'espace entre les touffes.

La présence de litière sous forêts (Adiopodoumé, Azaguié, Divo) ou sous cultures (coton au Cameroun ; ananas, canne, banane en Martinique) augmente énormément le CER (3 à 11).

Les tendances diffèrent sous savane en fonction de la présence d'un sous-étage herbeux au niveau du sol. Les savanes protégées du feu (Gonsé, Saria, Bouaké, Séfa) ont des CER de 3 à 11. A Korhogo, malgré les feux annuels, le CER atteint 11 sous savane herbeuse non pas à cause des touffes d'herbes espacées (feux fréquents), mais parce que la surface du sol est protégée par un tapis de gravillons ; on observe le même processus sur des sols caillouteux dans le désert avec formation d'un reg (couche superficielle d'où le vent a soufflé » les particules fines). En zone méditerranéenne semi-aride, le matorral, les parcours et les jachères pâturées modérément ont des CER plus élevés que les cultures et les jachères nues car le ruissellement est réduit aux zones tassées par les sabots du bétail : sous les touffes l'infiltration reste très élevée (Roose, 1996).

534. La **pente** intervient aussi pour réduire le CER (Adiopodoumé, Saria, Gonsé, Mascara).

Plus la pente est faible et moins le ruissellement a la capacité de tracter les grosses particules. Dès que la pente dépasse 15%, l'énergie principale provient du ruissellement en rigole et les processus évoluent de la battance (très sélective) vers l'érosion linéaire (rigole) ou même les mouvements de masse (creeping, érosion aratoire, non sélective).

Mais étant données les actions multiples des divers facteurs il est plus facile de mettre en évidence les divers facteurs de sélectivité dans une même zone que dans des stations aussi diverses que celles où nous avons effectué nos mesures.

6. Conclusions

6.1. Les pertes en terre sont très variables (0,04 à 700 t/ha/an) : mais ces mouvements de matières recouvrent des processus très différents d'autant moins sélectifs que l'érosion est forte et liée au ravinement et aux mouvements de masse.

6.2. Par rapport au bilan général du carbone au niveau d'une parcelle, les pertes de carbone particulaire par érosion sont faibles (POC = 0,1 à 350 kg C/ha/an), mais il faudrait ajouter les pertes en C dissout (DOC) dans les eaux de ruissellement et drainage (0,1 à 600 kg C/ha/an) qui augmentent lorsque le drainage augmente (climat très humide et pluies concentrées sur quelques mois).

6.3. Les pertes de carbone du sol sont plus importantes par minéralisation du carbone du sol, brûlis des litières et exportation des récoltes et déchets des cultures que par érosion (Roose, 1980).

6.4. L'impact de l'érosion sur le carbone du sol est donc négligeable tant que sa surface est bien couverte par une litière. Mais l'érosion du carbone n'est plus négligeable sur les sols cultivés peu couverts (éclatement des agrégats par la battance) et sur les fortes pentes (décapage de l'horizon humifère). Il s'en suit une réduction sensible du stock du carbone dans les sols fortement érodés.

6.5. La lutte antiérosive (LAE) mécanique (banquettes) modifie peu les pertes en C au niveau d'une parcelle : elle accélère l'exportation des sédiments dans le réseau de drainage.

6.6. Par contre la LAE biologique (semis direct sous la litière, gestion des adventices, résidus de culture, légumineuses de couverture, prairies temporaires, agro-foresterie, etc.) disperse l'énergie des pluies et du ruissellement, piège les sédiments grossiers et une partie des

matières organiques, réduit beaucoup l'érosion et apporte des matières organiques qui vont améliorer l'agrégation, l'infiltration et la résistance à l'érosion.

Ces techniques de gestion de la biomasse peuvent améliorer le stockage du carbone dans le sol et donc jouer un rôle actif dans la séquestration du carbone : il pourrait être raisonnable de chercher à faire financer ces techniques de LAE au titre de « puits de carbone ».

Références bibliographiques

Albergel J., Mansouri T., Zante P., Ben Mamou A., Abdeljaoued S., 2004. Organic matter in the sediments of hill dams in a semi-arid mediterranean area. In « Erosion and Carbon dynamics » E. Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B. Stewart, (eds), CRC Publisher, Advances in Soil Science, under press.

Albrecht A., Kandji ST., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 99 : 15-27.

Arabi M., 1991. Influence de 4 systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie). Thèse doct. Univ. Grenoble, départ. Géographie, 271 p.

Arabi M., Roose E., 2004. Influence du système de production et du sol sur l'érosion en nappe, le ruissellement, le stock de carbone et les pertes de carbone par érosion dans les montagnes du Nord de l'Algérie. Les Actes du coll. Internat. « Land use, erosion & carbon sequestration », Montpellier, 23-28/9 /02. BRE 22. Sous presse

Asseline J. et C. Valentin, 1977. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Document ORSTOM Abidjan, 34p. multigr.

Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R., Feller C., 2004. Effect of a legume cover crop on carbon storage and erosion in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. In E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B.Stewart (eds), CRC Publisher, Advances in Soil Science, under press.

Bep Aziem B., Boli Z., Barthès B., Roose E., 2004. Influence du labour, du fumier et de l'âge de la défriche sur le stock de Carbone du sol et les pertes de C par érosion et drainage dans une rotation intensive coton /maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux du Nord Cameroun (Station de Mbissiri, campagne 1995). In « Erosion & Carbon dynamics ». E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B.Steward (eds), CRC publisher

Bernoux M., Feller C., Cerri C.C., Eschenbrenner V., Cerri CE., 2004. Soil carbon sequestration. In « Erosion & Carbon dynamics », E.Roose, R.Lal, C.Feller, B. Barthès, B. Stewart (eds), CRC publisher...

Blanchart E., Roose E., Khamsouk B., 2004. Soil carbon dynamics and losses by erosion and leaching in banana cropping systems with different practices (Nitosol, Martinique, West Indies). In "Soil erosion & Carbon dynamics", E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B.Stewart, (eds), CRC Publisher Bull Réseau Erosion 22, sous presse,

Boli Z., 1996. Fonctionnement de sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord Cameroun. Thèse doct. Univ. Dijon, France, Edit Orstom Paris, 344 p.

Boli Z., Roose E., 1998. Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton-maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. Advances in Geocology 31 : 395-401.

- Boye A. and Albrecht A., 2004.** Soil erodibility control and carbon losses under short term tree fallows in Western Kenya. In "Erosion & carbon Dynamics", E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthes, B.Stewart (eds), CRC Publisher
- Brunet D., Brossard M., Lopes de Oliveira M.I., 2004 .** Organic carbon associated to sediments from erosion micro-plots under natural rainfall on a Ferralsol of Brazil. In "Erosion and carbon dynamics", E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B.Stewart (eds)., CRC publisher.
- Chaplot V., Le Bissonnais Y., Bernadou J., 2004.** Impact of land use history on the spatial variations of soil carbon erosion within a catchment under sloping land and tropical conditions. In "Erosion and carbon dynamics" E. Roose, R. Lal, C. Feller, B. Barthès, B. Stewart (eds), CRC Publisher in "Advances in Soil Science, ...: under press, 20 p.
- De Noni G. , Viennot M., Asseline J., Trujillo G., 2001.** Terres d'altitude, terre de risue. La lutte antiérosive dans les Andes équatoriennes. IRD edit.collection. Latitudes 23, Paris, 219 p.
- Diallo D., 2000.** Erosion des sols en zone soudanienne du Mali. Thèse doctorat Université Grenoble, Dept. Géographie, 202 p.
- Diallo D, Roose E., Orange D., 2004.** Influence du couvert végétal et des sols sur le stock de carbone du sol, les risques d'érosion et les pertes de carbone en zone soudanienne du Mali. In "Land use, erosion & carbon sequestration: abstracts "Coll. Int. Montpellier, 23-28/9/2002, p.30.
- Feller C., Beare M.H., 1997.** Physical control of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- Gachene C., Jarvis N., Linner H., Mbuvi J.P., 1997.** Soil erosion effects on soil properties in a highland area of Central Kenya. *S.S.S of America Journal* 61: 559-564.
- Hudson N, 1993.** Field measurement of soil erosion & runoff. *FAO Soil Bulletin* n° 68, 139 p.
- Jacinthe P.A., Lal R., Kimble J.M., 2002.** Carbon dioxide evolution in runoff from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils of Southwestern Ohio. *Soil and Tillage Research* 66 : 23-33.
- Khamsouk B., 2001.** Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol brun rouille à halloysite en Martinique. Thèse doct. ENSAM, Montpellier, 214 p.
- Lal R., 1983.** No-till farming. *Soil & water conservation and management in the humid tropics*. IITA, Ibadan , Nigeria, Monograph 2, 64 p.
- Lal R., 1998 .**Land use and soil management effects on soil organic matter dynamics on Alfisols in western Nigeria. P. 157-165.In : R.Lal, J.M.Kimble, R.F.Follett, B.A. Stewart (eds.), *Soil processes and the carbon cycle*, CRC Press, Boca Raton, Fl.
- Lal R., 2002.** Soil conservation and restoration to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. In Proc. Third Int. Congress "Man and soil at the third millennium" J.L.Rubio, R.P.Morgan, S. Azins, V Andreu (eds), Geofoma Ediciones, Logrono ;37-51.
- Lal R., 2003.** Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29 : 437-450.
- Lelong F., Roose E., Darthout R , Trevisan D., 1993.** Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées. *Science du Sol*, 31, 4 :251-279.
- Mazour M., Morsli B., 2002.** Influence de la couverture végétale et de l'érosion sur l'infiltration et l'érodibilité des sols dans des bassins du NO de l'Algérie. In "Land use, Erosion & Carbon sequestration : abstracts." Coll. Internat. Montpellier, p.80.
- Meybeck M., 2002.** Origines et comportement des formes du carbone dans les fleuves. In "Land use, Erosion & Carbon Sequestration : abstracts" Int. Colloquium Montpellier 24-28 Septembre 2002 : p. 37.
- Meyer LD., 1960.** Use of the rainulator for runoff plot research. *Soil Sci.Soc. Am. Proc.* 24 : 319-322.

- Morsli B., Halitim A., 2002.** Effets des systèmes de culture sur le ruissellement, les pertes en terre, en carbone et en nutriments dans les Monts de Beni Chougrane, NO Algérie. In "Land use, Erosion & C sequestration : abstracts." Coll. Int. Montpellier, p. 112.
- Morsli B., Mazour M., Halitim A., Medejel N., Roose E., 2004.** Land use effect on soil carbon storage and erosion in calcic brown soils of occidental Tell mountains of Algeria. In "Erosion & Carbon Dynamics" E. Roose, R.Lal, C.Feller, B. Barthès, B.Stewart (eds), CRC Publisher. Advances in Soil Science, under press.
- Moyo A., 1998.** The effect of soil erosion on soil productivity as affected by tillage with special references to clay & organic matter losses. Advances in Geo Ecology 31 : 363-368.
- Planchon O., 1991.** Etude spatialisée des écoulements sur les versants et leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple en savane humide à Booro-Borotou, Côte d'Ivoire. ORSTOM Montpellier , 340 p.
- Probst JL., 2002.** The role of continental erosion and river transports in the global Carbon Cycles :perspectives. In «Land use, Erosion & SEQC : abstracts » Int . Coll. Montpellier, p.8.
- Razafimbelo T., Barthès B., De Luca EF., Larré-Larrouy MC., Laurent JY., Cerri CC., Feller C., 2003.** Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration du carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. Etude et Gestion des Sols, 10, 3 : 191-200.
- Reicosky D.and Lindsrom M., 1995.** Impact of fall tillage on short term carbon dioxide flux. In : R.Lal, J.Kimble, E.Levine, B.Stewart.(eds). « Soil & global change », CRC Press.
- Revel JC., Coste N., Cavalié J., Coste JL., 1990.** Entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain (France). Cah ORSTOM Pédol, 25, 2 : 111-118 .
- Rodriguez A.R., Arbelo CD., Guerra JA., Mora JL., Armas CM., 2004.** Soil organic carbon pools in forest andosols of the Canary Islands : soil erodibility & carbon losses by erosion. E.Roose, R.Lal, C.Feller, B.Barthès, B.Stewart (eds), CRC Publisher, Advances in Soil Science, under press.
- Roose E., 1967.** Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agronomie Tropicale 22,2 :123-152.
- Roose E. et Henry des Tureaux P., 1970.** Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. Agron.Trop., 25, 12 : 1079-1087.
- Roose E., Bertrand R., 1972.** Importance relative de l'érosion, du ruissellement et du drainage oblique et vertical sous une savane arbustive de Moyenne Côte d'Ivoire (Bouaké, 1967-71). Document ORSTOM-IRAT, Côte d'Ivoire, 94 p. + annexes.
- Roose E., 1977.** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales . In « Travaux et documents de l'ORSTOM », N° 78, Paris, 108 p.
- Roose E., Godefroy J., 1977.** Pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de Basse Côte d'Ivoire (Azaguié, 1967-75). Doc. ORSTOM-IRFA, Abidjan, 116 p.
- Roose E., 1978.** Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous une savane arborée du plateau Mossi, Haute Volta (Gonse, 1968-74). Doc. ORSTOM, Paris, 121 p.
- Roose E., 1979.** Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire. Cah.ORSTOM Pédol.17, 2 : 81-118.
- Roose E., 1980.** Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire. Doc. ORSTOM , Paris, 172 p.
- Roose E., 1981.** Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles et cultivées. Travaux et Documents ORSTOM n° 130, Paris, 569 p.

- Roose E. et Sarailh JM., 1989.** Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah.ORSTOM Pédol., 25, 1 : 7-30.
- Roose E., 1996.** Land husbandry : component and strategy. FAO Soils Bulletin, Rome, 70, 370 p.
- Roose E., Khamsouk B., Lassoudière A., Dorel M., 1999.** Origine du ruissellement et de l'érosion sur sols bruns à halloïsité sous bananeraies de Martinique. Bull Réseau Erosion ORSTOM Montpellier, 19 : 139-147.
- Roose E., Barthès B., 2001.** Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Francophone Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 61 : 159-170.
- Roose E., 2002a.** Evaluating, monitoring and forecasting erosion. ISCO 12 conf. , Tsinghua Univ . Press, Beijing : 3-10.
- Roose E., 2002b .** Perte de carbone par érosion et indice de sélectivité: influence du couvert végétal, du sol et des processus d'érosion sur des versants de régions tropicales. In "Land use, Erosion & Carbon sequestration: abstracts" Coll Montpellier , France : p.10.
- Wan Y., El-Swaify S.A., 1997.** Flow induced transport and enrichment of erosional sediment from a well aggregated and uniformly textured Oxisol. Geoderma 75 : 251-265.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978.** predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning. USDA, ARS, Washington DC, USA, handbook 537, 58 p.