

Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives

Éric Roose
Georges De Noni

Institut de recherche pour le développement (IRD),
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France
<roose@mpl.ird.fr>
<denoni@mpl.ird.fr>

Résumé

Les problèmes posés par l'érosion sont connus depuis plusieurs siècles, dans le bassin méditerranéen en particulier, mais les recherches ne se sont développées que depuis 50 ans en Afrique. Elles concernent avant tout l'érosion en nappe et rigoles qui décape l'horizon humifère en une génération. Or l'Afrique a connu une croissance impressionnante de la population ce dernier siècle (celle-ci a été multipliée par 5 en 100 ans) et aussi des besoins en biens de consommation : d'où l'accélération de l'érosion et de la dégradation des terres et l'importance des recherches sur la protection et la restauration de la productivité des terres. L'analyse des résultats à l'aide de l'équation USLE (*Universal Soil Loss Equation*), a permis de constater que les pluies tropicales sont très agressives, que les sols tropicaux sont heureusement assez stables et assez résistants à la battance, que la gestion du couvert végétal (et minéral) est très efficace, que le facteur topographique est beaucoup plus complexe que prévu et que les techniques culturales antiérosives sont peu efficaces sur des pentes de plus de 20 %. En montagne, le ravinement et les différentes formes de mouvements de masse, rapides ou lents, sont beaucoup plus importants que l'érosion en nappe mais ils sont peu étudiés. La spatialisée des mesures localisées pose encore des problèmes que l'on tend à résoudre par l'usage d'indicateurs (états de surface, stabilité structurale, radio-isotopes) combinés à des systèmes d'information géographique (SIG). Les techniques de mesures évoluent vers des techniques soit très sophistiquées (mais coûteuses) soit au contraire très simples, permettant de nombreuses estimations dans l'espace et le temps. Enfin, la lutte antiérosive (LAE), longtemps fondée sur des grands travaux de terrassement, coûteux et peu efficaces, évolue vers des approches participatives reposant sur l'adaptation des systèmes de culture et la mise au point de techniques biologiques combinées avec des compléments de fertilisation pour mieux valoriser la terre et le travail.

Mots clés : Érosion hydrique ; Recherche ; Afrique.

Summary

The Research on water erosion in Africa. Review and perspectives

An all-time problem the world over, erosion and its control has been studied and documented for centuries, especially around the Mediterranean, but as far as Africa is concerned, research started developing but about 50 years ago, dealing mainly with sheet and rill erosion which scoured the humiferous topsoil in the span of a generation. Africa has had an impressive population growth rate (its population has increased fivefold over the last hundred years) ; meanwhile, the needs for food, medicines, consumable goods, etc. increased accordingly, thereby accelerating soil degradation through erosion and, in turn, the urgent need for research on soil protection, water and nutrients management, soil productivity restoration, etc. More than 1,000 data on sheet erosion from runoff plots in various ecological conditions are now being collected yearly. The analysis of this data using the USLE (Universal Soil Loss Equation), showed that tropical rains are very aggressive, ten times more so in fact than temperate rains. Fortunately, however, it appears that most tropical soils are rather resistant to drop energy (though not necessarily to runoff energy) and biomass control is quite efficient to reduce water, nutrients, and erosion losses.

Topographical factors are much more complex than previously suspected: topographical positions being sometimes more important than slope steepness. Slope length becomes important when runoff is collected in rills and gullies, but in the case of sheet runoff rainfall energy is dispersed on the topsoil roughness. Line ploughing and ridging is useful on smooth slopes only but not on slopes exceeding 20%. There are numerous interactions between a number of factors that are not accounted for in either the USLE or others models. In mountainous steep lands, gullies and landslides, or tillage erosion are much more important than sheet erosion, but they are less studied and more difficult to control. The spatialisation of locally accurate measurements is difficult to extend to large watersheds and the trend is now to resort to indicators such as surface features, aggregate stability, or radioisotopes like Cesium 137) and combine them into a GIS. Measurements techniques are evolving towards either more sophisticated systems (smart but most of the time very costly) or very simple tools allowing measurements to be repeated very often (erosion typology, land uses, surface features). Finally, erosion control (SWC), formerly based on earthworks and embankments, which have proved to be very expensive, time-consuming and rather poorly efficient, is now turning over to participative approaches based on the adaptation of farming systems and the development of biological or cultural practices combined with complementary fertilisation with a view to best use both soil and labour.

Key words: Water Erosion; Research; Africa.

Les premiers explorateurs qui débarquèrent en Afrique tropicale, en voyant l'abondance de la végétation sous forêt, pensèrent que les sols devaient y être particulièrement riches. Mais ils déchantèrent rapidement, car une fois la terre défrichée, les rendements des cultures baissèrent en quelques années. Dans son livre *Afrique, terre qui meurt*, Harroy [1] avait déjà décrit les deux causes de la dégradation rapide de la fertilité des sols africains : la minéralisation rapide de l'humus sous les climats chauds et humides et l'érosion des sols dénudés soumis aux pluies diluviennes. L'érosion a donc été observée très tôt, mais les recherches ne commencèrent vraiment que vers les années 1950.

Depuis lors, les travaux sur l'érosion en Afrique ont fleuri abondamment à mesure que la mise en valeur mécanisée de ces terres fragiles soumises aux orages tropicaux a développé des phénomènes spectaculaires d'érosion. Aussi est-il impossible de citer tous les chercheurs (plus de 500 rien que dans le Réseau Érosion et à l'*International Soil Conservation Organization*, ISCO) qui ont exploré les divers thèmes liés à des processus d'érosion très variables en fonction de la diversité des écosystèmes, des climats, du relief, des cultures et de la densité des populations. Cette tentative de synthèse ne peut être exhaustive : elle s'attachera dès lors à souligner l'évolution historique des recherches effectuées par les principales équipes au Maghreb, en Afrique occidentale, en Afrique centrale et à Madagascar, les principaux résultats et quelques orientations pour l'avenir.

La période coloniale (1940-1960) : phase d'exploration des risques

Dans l'ancien Congo belge, les agronomes de l'Institut national d'études agronomiques du Congo (INEAC) avaient déjà constaté les effets dégradants des techniques culturales laissant les sols dénudés : ils avaient développé des plantes de couverture associées à des cultures pérennes, des rotations et des systèmes de cultures en couloir entre des haies vives. De façon plus globale, ces problèmes donnèrent lieu à une politique de mise en réserve de larges zones protégées et à la création de parcs nationaux [1].

En Afrique francophone, sous l'impulsion de Fournier [2], s'est mis en place un réseau de parcelles d'érosion dans une dizaine de pays francophones pour quantifier les dangers de ruissellement et d'érosion sous les divers systèmes de culture régionaux [3-5]. À Madagascar, Tricart [6] a distingué l'érosion naturelle de l'érosion accélérée par la gestion maladroite des ressources en sol par une population croissante ; il a souligné le caractère non linéaire des processus d'érosion. D'autres géographes physiciens ont étudié l'érosion en Afrique : Rougerie en Côte d'Ivoire, Sautter au Congo, Michel au Sénégal [7-9]. Pour leur part, les chercheurs du Centre technique forestier tropical (CTFT) ont comparé les risques d'érosion sous divers couverts naturels ou cultivés à Madagascar, au Niger et au Burkina [10]. En Rhodésie (Zimbabwe), Hudson [11, 12] a développé une série impressionnante de dispositifs de mesure de l'érosion sous pluies naturelles ou simulées, à la fois

pour démontrer l'importance de l'énergie des pluies, mais aussi du couvert végétal, de la pente, des sols et du mode de gestion. En prouvant que si le sol est bien couvert on peut réduire l'érosion par cent et le ruissellement par dix, il a montré que l'intensification de l'agriculture n'entraîne pas forcément l'accélération de la dégradation des sols. Parti de l'héritage de Bennet sur la lutte antiérosive mécanique (terrasses), Hudson s'est finalement orienté vers une approche plus biologique de la gestion durable de l'eau et des sols [13].

Recherche de données pour valider des modèles

Après une phase de description des processus, commence une période de quantification de l'érosion à diverses échelles, de la parcelle d'une centaine de m² à des micro-bassins de quelques hectares et à de grands bassins-versants de milliers de km².

Érosion en nappe

Un réseau de parcelles de tailles et de modes d'exploitation standardisés a été mis en place en Afrique pour estimer les paramètres des modèles empiriques disponibles [14-24]. Parmi ceux-ci, le modèle USLE (*Universal Soil Loss Equation*) de Wischmeier et Smith est le plus largement utilisé : l'érosion est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies que multiplie la résistance du milieu (érodibilité, facteur topographique, couvert végétal et pratiques culturales, pratiques antiérosives) [25].

Pour accélérer l'étude des facteurs du ruissellement et de l'érosion dans les grands espaces africains, une série de simulateurs de pluies ont été développés. Dumas, Cormary et Masson [26, 27] ont tenté de quantifier les paramètres de l'USLE en Tunisie. Kalman [28] a étudié le facteur climatique modifiant l'érosion en nappe et rigoles sur les principaux sols cultivés du Maroc. Ensuite, une douzaine de pédologues et hydrologues Orstom ont consacré leurs travaux à l'étude du ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées : influence des sols et des techniques culturales en Afrique de l'Ouest [29-33].

• Érosivité des pluies ($r = 50$ à $> 1\ 000$)

Très vite, il fut admis que l'érosion en nappe dépend de la hauteur, de l'intensité, de l'énergie cinétique et de la répartition des pluies : divers indices d'agressivité des pluies furent proposés, plus ou moins adaptés localement :

– indice d'érosivité de Hudson : $KE > 25$ mm/h. Il ne tient compte que de l'énergie des pluies intenses de plus de 25 mm/h, seuil d'intensité au-delà duquel se déclenche le ruissellement sur les Oxisols très stables de Rhodésie. Sur cette base, Stocking et Elwell [19] établirent une carte d'agressivité climatique de Rhodésie ;

– indice d'érosivité des pluies de Wischmeier : $R = E_{30}$, qui tient compte du produit de l'énergie cinétique par l'intensité maximale pendant 30 minutes, ce qui est en relation étroite avec le volume du ruissellement ;

– en calculant cet indice sur une vingtaine de postes météo sur plus de dix années, Roose [14, 29] a constaté qu'en Afrique occidentale, l'indice d'érosivité de Wischmeier annuel moyen (Ram en unités américaines) est lié directement à la pluviosité annuelle moyenne (Ham en mm) de cette région : $Ram = Ham \times a$ où « a » s'établit à 0,50 en plaine, à 0,60 près de l'océan, à 0,25-0,30 en montagne tropicale (Cameroun et Rwanda-Burundi) et à 0,10 en montagne algérienne. Contrairement à l'opinion générale, les pluies tropicales sont nettement plus agressives que celles qui tombent en montagne, autour du Bassin méditerranéen et en régions tempérées. En région tropicale, l'agressivité des pluies varie de 100 à 200 au Sahel, de 400 à 600 en savane et atteint plus de 1 000 en zone de forêts équatoriales ; en milieu tropical humide, l'agressivité des pluies est 10 à 20 fois supérieure à celle des régions tempérées [25] ;

– Lal, au Nigeria, a trouvé de meilleures corrélations entre l'érosion et l'indice d'érosivité des pluies en tenant compte de l'intensité en 7 minutes et de l'énergie apportée par le vent. Cependant, il est rare de disposer de ces informations [18].

• Érodibilité des sols (facteur $K = 0,40$ à $0,01$)

Contrairement à l'opinion générale, les sols tropicaux sont souvent moins fragiles que les sols tempérés : si on observe tant d'érosion en Afrique, c'est surtout à cause des pluies très agressives [14]. L'érodibilité des sols n'est pas homogène dans l'espace et elle évolue dans le temps : elle augmente au cours de la saison des pluies et varie en fonction des caractéristiques des sols, de l'âge du défrichement et des techniques culturales [15]. La première année après défrichement, les sols sont généralement très stables ($K < 0,1$), mais ensuite l'érodibilité varie en fonction de la minéralisation des matières organiques et des remontées d'éléments provenant du sous-sol, plus riche en argile, en $CaCO_3$, en cailloux et en hydroxydes de fer et d'alumine libres.

Bien que les classifications pédologiques ne reposent pas sur les facteurs de l'érodibilité des sols, on remarque certaines constantes :

– les sols ferrallitiques sont généralement assez résistants : K varie de 0,01 à 0,20, si on passe de roches à altérites argileuses (basaltes) à des roches à altérites argilo-sableuses (granites) ou à un schiste libérant des limons ;

– les sols ferrugineux tropicaux sont plus fragiles après deux années de culture ($K = 0,20$ à $0,30$) ;

– les sols gravillonnaires et lithosols sont très résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,01$ à $0,04$) ;

– les Vertisols calciques sont très résistants ($K = 0,001$ à $0,01$), alors que les Vertisols sodiques seraient très fragiles ($K > 0,40$) ;

– les sols bruns calcaires méditerranéens sont d'autant plus résistants qu'ils ont une charge importante en cailloux et des fortes teneurs en argile saturée en calcium ($K = 0,10$ à $0,01$) ;

– les sols rouges fersiallitiques méditerranéens lessivés sont généralement assez fragiles ($K = 0,20$).

L'amélioration de la résistance d'un sol à l'érosion pluviale est difficile car l'augmentation de 1 % du taux de matière organique (MO) du sol exige beaucoup d'apports organiques pour compenser la minéralisation rapide en milieu chaud et ne réduit que de 15 % les risques d'érosion sur des sols sablo-argileux. L'épierreage des champs augmente leur sensibilité à la battance et au ravinement ; en revanche, l'épandage des cailloux en surface permet de maintenir une bonne infiltration [34]. Un compromis acceptable par les paysans consiste à garder sur place les petites pierres pour protéger les sols de la battance et à rassembler les grosses pierres (qui gênent le labour et le semis) sur des lignes de défense (cordons de pierres)

pour ralentir le ruissellement et réduire la pente. Le défonçage profond peut améliorer l'infiltration sur un sol encroûté (calcaire ou ferrugineux), mais n'a qu'une influence passagère sur les sols instables.

• Couvert végétal (facteur $C = 1$ à $0,001$)

Par rapport à une parcelle nue, le couvert des principales cultures d'Afrique réduit l'érosion de 20 à 60 %, en fonction de l'intensité du couvert et des techniques culturales : le facteur C diminue jusqu'à 0,01 sous cultures pérennes avec plantes de couverture ou prairie et à 0,001 sous forêt et cultures paillées. Le couvert végétal est donc le paramètre le plus important à notre disposition pour réduire les risques d'érosion : la lutte antiérosive biologique va donc proposer de planter tôt, à forte densité, des cultures associées ou se succédant dans le temps, de façon à absorber le plus complètement possible l'énergie cinétique des pluies et du ruissellement [14, 25].

Hudson a montré qu'une simple toile moustiquaire tendue à 15 cm du sol est aussi efficace qu'une pelouse pour réduire l'érosion d'au moins 99 % et le ruissellement sur sol nu de 90 % : le taux de couverture par la canopée basse semble donc plus important que le type de végétal et même que l'enracinement (efficace contre le ravinement). Hudson a encore montré qu'en doublant la densité du maïs, on réduit par trois la perte en terre par kg de maïs produit : l'intensification des cultures peut donc réduire les risques d'érosion [11]. Elwell et Stocking ont ensuite développé un indice de couvert végétal : en Rhodésie, tant que la culture ne laisse pas plus de 30 % du sol dénudé, il ne se développe pas d'érosion dangereuse, bien que le ruissellement reste important [20].

Au Maroc, Laouina [35] a observé que lorsque le sol est couvert de matorral dense, d'herbes rases, de cystes ou de rocaille, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an, mais que dès que le sol est labouré pour une culture sarclée, l'érosion peut s'élever à plus de 20 t/ha/an sur des pentes de 20 % en année à fortes pluies. Sur jachère, les sédiments sont souvent piégés dans les touffes d'herbes, mais le ruissellement est abondant entre les touffes. La différence entre la forêt naturelle et les zones de parcours réside surtout dans le ruissellement abondant là où les sabots du bétail ont tassé la surface du sol : le pâturage excessif entraîne souvent le ravinement des zones en aval [36].

• Topographie (facteur $SL = 0,1$ à 20)

Dans le modèle USLE, n'interviennent que l'inclinaison de la pente (entre 2 et 25 %) et secondairement la longueur de pente ($L^{0,5}$). Or il existe de multiples interactions entre l'influence de la pente, la forme

concave ou convexe, l'état de la surface du sol et la position topographique : c'est donc un paramètre qui pose des problèmes.

D'abord, il est apparu que le ruissellement sur les pentes de plus de 2 % diminue sur des sols ferrallitiques [11, 14, 16] alors qu'en général l'érosion augmente de façon exponentielle sur des parcelles mal couvertes. Sur sol paillé, en revanche, l'énergie des pluies et celle du ruissellement sont dissipées par le frottement avec les résidus : les pertes en terre restent donc très modestes, même sur fortes pentes [25]. En Algérie, non seulement le ruissellement, mais aussi l'érosion, ne croissent pas systématiquement avec la pente [37]. Dans les collines du Rwanda et Burundi, il semble que le ruissellement est modéré et que les pertes en terre se stabilisent au-dessus de 25 % de pente ; au-delà, les sols sont moins épais, plus argileux ou caillouteux et les processus en cause changent : de l'érosion en nappe, on passe aux rigoles et à des mouvements lents de la couche superficielle du sol (*creeping*) [38-40].

L'effet de la longueur de pente n'est pas évident non plus : seules les parcelles soumises à l'érosion linéaire (rigoles) perdent d'autant plus de terre qu'elles sont plus longues et donc plus grandes. Mais, dans le cas du ruissellement en nappe dont l'énergie est dissipée par la présence d'une litière ou par la rugosité du sol, l'influence de la longueur de pente devient négligeable [25]. Sur les glacis sablonneux du Nord-Cameroun, l'augmentation de la longueur (de 20 à 60 m) et de la surface des parcelles (100 à 1 000 m²) sur un versant de 2 % n'a augmenté ni le ruissellement, ni l'érosion [41].

En revanche, on a observé que la position topographique est parfois plus importante que la pente elle-même. Un cas a été signalé par Heusch [16] sur une colline marneuse du Maroc où les eaux s'infiltrèrent sur les versants par les fissures des Vertisols, se concentrent en bas de pente et créent des ravines remontantes. De même, en Côte d'Ivoire, Valentin *et al.* [42] ont montré que les sommets des collines sont couverts de sols ferrallitiques gravillonnaires rouges très stables, tandis que sur les versants ferrugineux tropicaux plus fragiles naissent des ravines discontinues, et que dans les bas-fonds hydromorphes se développent de grosses ravines remontantes.

Pour lutter contre l'érosion, on connaît les multiples formes de terrasses, cordons de pierres, haies vives qui modifient à la fois l'inclinaison et la longueur de pente. L'expérience montre que ces systèmes sont coûteux en travail à l'installation mais aussi à l'entretien. De plus, une fois ces structures en place, il faut encore faire

l'essentiel, c'est-à-dire fertiliser et aménager l'espace entre ces structures spectaculaires souvent indispensables, mais insuffisantes pour gérer efficacement les eaux des versants [25, 43].

- Techniques antiérosives (facteur P = 1 à 0,1)

L'influence des techniques culturales n'est pas négligeable sur les longs glacis de pentes inférieures à 3 % : le labour et surtout le billonnage cloisonné en courbes de niveau améliorent le stock d'eau du sol et les rendements des cultures. Mais, en montagne, sur des pentes de 25 à plus de 60 %, le ruissellement diminue tandis que les pertes en terre augmentent : on passe d'une érosion en nappe et rigoles à une érosion linéaire, voire au *creeping*. La même tendance a été observée en Équateur et en Martinique [44].

Sur les sols sableux des zones soudano-sahéliennes, Charreau et Nicou [45, 46] ont montré que le labour permet un meilleur enracinement et, temporairement, une meilleure infiltration. Par ailleurs, Lal [18], dans une zone plus humide du Nigeria a noté qu'à la longue, le labour détruit l'agrégation de sols ferrallitiques, tandis que le semis direct sous litière permet une production plus durable, avec moins d'érosion et des activités biologiques (vers de terre) améliorant l'infiltration et l'agrégation.

Boli *et al.* [23] au Nord-Cameroun et Diallo [24] au Sud-Mali dans une zone soudanienne, sur des sols ferrugineux sableux à argilo-sableux, ont observé sur le semis direct dédié à une rotation coton/maïs intensive, une réduction notable de l'érosion (y compris de la charge en suspension) et du ruissellement. Mais au bout de cinq ans, le taux de matière organique du sol sur 10 cm était toujours aussi faible. En revanche, deux années de jachère arbustive (*Cassia siamea* mélangé à *Andropogon*) a permis d'augmenter l'activité des vers de terre, de réduire le ruissellement et l'érosion et de doubler le taux de carbone du sol [47].

Au total, plus de mille résultats annuels de parcelles d'érosion ont été obtenus en Afrique, mais les données sont si dispersées qu'il est difficile de les utiliser pour tester la validité des modèles.

On ne peut conclure cette revue des informations disponibles sans rappeler les limites du modèle empirique USLE qui ne s'applique qu'à l'érosion en nappe, dont la source d'énergie est la pluie. Au-delà de 20-25 % de pente, ce modèle ne s'applique plus, car l'énergie du ruissellement devient prépondérante. En outre, pour fonctionner, ce modèle nécessite des données moyennes accumulées sur plusieurs années et n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse. Enfin, la fonction du

modèle étant multiplicative, certaines interactions entre facteurs ne peuvent être prises en compte.

Bien qu'il ait été souvent utilisé hors de son domaine, si l'on dispose d'un minimum de mesures représentatives de la région, on peut caler des paramètres adaptés localement pour évaluer les pertes en terre au niveau des champs, mais non au niveau des bassins-versants.

D'autres modèles empiriques ont été proposés, qu'il s'agisse de RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) où on a tenté d'affiner les paramètres pour les principaux sols et couverts végétaux du Maroc, de MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) où l'énergie des pluies a été remplacée par celle du ruissellement, ou de SLEMSA (*Soil Loss Equation for Southern Africa*) pour l'Afrique du Sud où les interactions sont regroupées différemment [17, 20, 48].

Ravinement

Les recherches pour quantifier le ravinement sont bien moins nombreuses, alors que les paysages méditerranéens ou tropicaux semi-arides sont souvent lacérés par le ruissellement concentré, même sous savane arborée [42].

Signalons les études de Stocking [49] sur la vitesse d'avancement des ravines au Zimbabwe sur des alluvions salées très fragiles. Il constate que, quel que soit le type de ravine observé, l'érosion dépend du volume des pluies (P en mm), de la surface du bassin (S en km²) et de la hauteur de chute en tête de ravine (H en m). L'équation s'écrit :

$$\text{Érosion en ravine} = 6,87 \times 10^{-3} P^{1,34} \times S \times H^{0,52}$$

En Algérie, le volume en creux d'un réseau de ravines a été suivi pendant trois ans : le transport solide varie de 90 à 300 t/ha/an en fonction du sol et du substrat, de la pente et de la distance au réseau de drainage, des pluies et de leur répartition en fonction de l'humidité du sol [25, 50, 51]. En zone méditerranéenne, le ravinement commence généralement à une certaine distance du sommet de la colline, dans les concavités du versant où les rigoles réunissent suffisamment de ruissellement. Cependant, beaucoup de ravines commencent à mi-pente, à l'endroit où le ruissellement hypodermique débouche à l'extérieur du sol, ou même en bas de pente du fait du creusement du réseau de drainage : par effet de chute, les têtes de ravine remontent ensuite la pente en profitant des chenaux souterrains de drainage et/ou de la dissolution du gypse ou autres sels solubles inclus dans la roche [52].

L'importance des divers processus d'érosion varie beaucoup dans les principaux

Tableau 1. Importance de divers processus d'érosion (t/ha/an) en fonction de trois paysages en Afrique [57].

Paysages	Pente	Érosion en nappe	Érosion aratoire	Érosion en ravine
Basses montagnes méditerranéennes	10 à 40 %	0,1 à 20	10 à 50	90 à 300
Longs glacis soudano-sahéliens	1 à 3 %	0,1 à 35	2 à 5	20 à 100
Collines convexes tropicales humides	4 à 30 %	0,1 à 700	10 à 50	100 à 500

paysages d'Afrique. Elle dépend de la répartition de l'énergie des pluies au cours de l'année agricole, du type de pente, de la résistance des sols à la battance et au cisaillement par le ruissellement, de la cohésion du sol et des roches.

En zone méditerranéenne, l'érosion en nappe est modeste, quelle que soit la pente, vu la stabilité des sols, le taux de cailloux et celui d'argile saturée en calcium [37]. Au Maroc, il a été démontré sur divers petits bassins que l'érosion en ravine est beaucoup plus active que l'érosion en nappe [16, 53, 54]. En Tunisie, Collinet et Zante [52] ont montré l'importance du ruissellement hypodermique (*piping*) sur le ravinement des marnes gypseuses.

Dans la zone soudano-sahélienne (tableau 1), les pentes sont douces, mais les sols encroûtés, d'où une érosion en nappe peu agressive. Le ravinement est en revanche très actif, même sur des pentes de 1 %, car les versants des glacis sont très longs et le ruissellement très abondant. Enfin, dans les collines en demi-orange des régions tropicales humides, l'érosion en nappe peut atteindre 700 t/ha/an sur le bas des versants convexes, mais elle n'augmente plus guère avec la pente. Le ravinement peut être très mordant après dénudation du sol (urbanisation, piste à bétail) [38, 55].

En zone tropicale semi-aride de Tanzanie, Rapp *et al.* [56] ont montré l'importance des orages exceptionnels pour le développement des ravines, alors qu'elles progressent peu en temps ordinaire.

Cartographie et effets d'échelle

Si les méthodes expérimentales et paramétriques décrites antérieurement, permettent de mesurer l'intensité des processus d'érosion, seule la cartographie fournit des indications sur l'ampleur spatiale des phénomènes. L'apport de la cartographie dans l'étude de l'érosion s'est concrétisé par l'utilisation de trois types principaux de cartographie : i) la cartographie à grande échelle (de 1/50 000 à 1/200 000) ; ii) la cartographie à petite échelle (de 1/500 000 à 1/10 000 000 ; et iii) l'utilisation des SIG et des indicateurs, sans échelles vraiment déterminées. A chaque type correspond une période bien définie.

- *La première période* couvre l'époque coloniale jusqu'au milieu des années 1970. A cette époque, les recherches en Afrique concentrent un maximum d'efforts sur l'étude des milieux naturels et anthropisés et se focalisent sur l'inventaire des ressources naturelles : le sol, l'eau et la végétation sont particulièrement étudiés. La cartographie est le support de base pour les chercheurs de cette époque qui sont avant tout des naturalistes et qui fondent leurs travaux sur les observations directes du terrain. Les pédologues, seuls ou associés à des géographes [58], dressent des cartes à grande échelle (de 1/50 000 à 1/200 000) : le rôle des chercheurs de l'Orstom fut très important dans la connaissance de ces milieux tropicaux africains comme en témoigne l'importante production bibliographique de cet institut [59-65].

Sur ces cartes, sont figurées les unités morpho-pédologiques et des informations complémentaires où l'on retrouve systématiquement des indications sur les manifestations principales de l'érosion. En outre, lorsque ces cartes servent à leur tour de support pour élaborer des cartes d'aptitude des terres, apparaissent de nouvelles informations relatives à l'érosion. Dans ce cas, la légende indique les potentialités érosives ou les risques d'extension des processus d'érosion qui sont fonction à la fois de la vulnérabilité des sols à l'érosion au moment de la cartographie et des pressions à venir, le plus souvent d'origine anthropique, modifiant la vulnérabilité de départ.

- *La deuxième période* débute dans les années 1975-1980 et marque la prise de conscience, au plan international, de la gravité des phénomènes de dégradation et d'érosion des sols dans les pays tropicaux, associée à une croissance démographique galopante. En effet, dès 1972, lors de la réunion de Stockholm, la première conférence des Nations unies sur l'Environnement fait état d'un constat très alarmiste, notamment en Afrique, et crée le Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE). Cet effort, auquel s'associeront ensuite la FAO, l'Unesco, l'Association internationale de sciences du sol, aboutira au lancement, en 1987, du programme d'évaluation de l'état actuel de dégradation des sols dans le monde,

connu sous le sigle GLASOD (*Global Assessment of Soil Degradation*) [66]. En 1990, la carte de l'état actuel de dégradation dans le monde fut terminée, à l'échelle de 1/10 000 000. Une superficie de l'ordre de 19,6 millions de km² (soit 16 % des terres exploitables dans le monde) est touchée par des phénomènes de dégradation. L'érosion par l'eau est le phénomène le plus répandu (55 % des terres dégradées), suivie de l'érosion par le vent (28 %), la dégradation chimique par perte de nutriments (7 %), la salinisation (4 %) et la dégradation physique (3 %). Rappelons cependant, que Fournier, en pionnier, avait ouvert cette voie vingt ans plus tôt, en 1960, en réalisant une carte mondiale des dangers d'érosion fondée sur des indices climatiques et topographiques à l'échelle des grands bassins-versants [67].

Pour élaborer de tels documents à l'échelle mondiale, lorsque les données de base n'existent pas, ce qui est très souvent le cas en Afrique, le recours à la télédétection est impératif pour combler les manques. Cet outil a donc été très largement utilisé à cette époque et testé pour identifier les manifestations de l'érosion. Néanmoins, malgré les avantages incontestables apportés par cette technique, cette dernière n'a pu résoudre que partiellement les problèmes majeurs et il subsiste toujours des contraintes essentielles fortes pour les pays tropicaux : i) cette technique est coûteuse et nécessite du personnel très qualifié ; ii) si la qualité du point de résolution, ou pixel, s'est considérablement améliorée, l'échelle reste néanmoins encore insuffisante pour pouvoir apprécier l'érosion à l'échelle du bassin-versant, de sorte que les observations locales des processus d'érosion, et les mesures qui en dérivent, continuent de poser des problèmes d'échelles impossibles à identifier sur les images : entre les parcelles des sommets de pentes, les ravines des versants, le transport solide des fleuves, on peut imaginer toute une série de piègeages, colluvionnements et alluvionnements, mais aussi ravinement et érosion remontante selon la position topographique [42] ; et iii) la couverture végétale dense en Afrique humide constitue un écran naturel qui empêche l'interprétation correcte des images.

D'ailleurs face à ces contraintes difficiles à éliminer pour la télédétection, se développent des techniques de télédétection rapprochée qui permettent de capter des images de haute résolution et d'échelle décimétrique. L'Institut de recherche pour le développement (IRD) a conçu un drone [68] qui sert de relais entre l'image satellitaire et le terrain.

- *La troisième période* est marquée par l'introduction du concept d'indicateurs

dans les méthodes de suivi de l'érosion. À partir des années 1990, les Nations unies tentent de rénover leur approche et de remplacer la méthode d'évaluation de la dégradation des terres, vieille d'une quinzaine d'années. Ils proposent de rechercher dorénavant les indicateurs de qualité des terres – *Land Quality Indicators* [69-71]. La notion d'indicateur sera très utilisée jusqu'à présent. Pour les indicateurs spatialisables, le succès est amplifié par le développement, en parallèle, des systèmes d'information géographique (SIG). Ces derniers constituent, en effet, des outils puissants et pertinents pour stocker, croiser et comparer les indicateurs, ainsi que pour calculer leurs superficies d'application respectives [72]. Certains, comme Le Landais et Fabre [73], ont appliqué avec succès le modèle USLE dans un SIG afin d'identifier les zones les plus fragiles qui menacent d'envasement le barrage du bassin du Ouergha au Maroc. D'autres ont utilisé cet outil afin de relier les risques de ruissellement et d'érosion avec des indicateurs tels que les constituants du sol et les états de surface [74, 75]. Enfin, un petit groupe s'est intéressé aux possibilités offertes par le Césium 137 qui s'est réparti au hasard sur les paysages, il y a 30 ans, à la suite des essais nucléaires dans l'atmosphère. L'étude du Césium radioactif dans les sols permet ainsi d'évaluer les pertes et les gains de sédiments marqués dans les diverses zones d'un bassin-versant [76]. Cette évaluation est réalisée et validée sur place, en espérant que le Césium 137 a été réparti de façon homogène, quels que soient le couvert végétal et la topographie, ce qui pose un problème de méthode non résolu pour l'instant.

Pour sa part, Brabant [77] a exploité plus à fond encore les avantages offerts par les SIG et la méthode des indicateurs, jusqu'à introduire le concept d'indice d'état qui permet de combiner entre eux différents indicateurs. Par exemple, pour évaluer l'état d'érosion, sont suggérés trois indicateurs principaux qui se réfèrent : i) au type d'érosion ; ii) à son extension sur le terrain ; et iii) à son degré de gravité. Ces trois indicateurs sont ensuite agrégés pour former un indice synthétique permettant de qualifier l'état érodé du site étudié.

Cette évolution récente étant rappelée, ne perdons pas de vue que le recours aux SIG et aux indicateurs nécessite la numérisation de toutes les données cartographiques disponibles, notamment des cartes topographiques qui servent de support au repérage géographique dans cette base. Ce type d'outil ne semble pas encore bien adapté à tous les pays africains car le travail de numérisation est long et coûteux et la couverture cartographique reste très incomplète.

Érosion, pertes de nutriments et séquestration du carbone

L'érosion n'est pas seulement considérée pour le décapage des profils pédologique, ou le transport de sédiments, mais aussi pour la perte d'eau et de nutriments qu'elle entraîne. Très rapidement, on a remarqué que l'érodibilité des sols est en relation avec le taux de MO des horizons superficiels des sols : plus le sol est riche en humus et en argile, mieux il est structuré, plus ses agrégats sont résistants à la battance des pluies, et plus le taux d'infiltration est élevé et stable [78-80].

Par ailleurs, on a observé que les sédiments qui sortent des parcelles érodées sont plus riches en argile et limons fins, en matières organiques et en nutriments associés, en particulier en carbone, azote et cations : l'érosion en nappe est un moteur de l'appauvrissement en particules fines et nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols africains sablo-argileux [25].

Pertes en nutriments

Des bilans des pertes par érosion et ruissellement ont été calculés sur des parcelles tout au long d'une séquence allant de la forêt subéquatoriale d'Abidjan jusqu'aux savanes arborées des environs de Ouagadougou au Burkina [15, 25, 81]. Ils montrent que les pertes en nutriments reflètent assez fidèlement les teneurs dans les dix premiers centimètres du sol et dépendent essentiellement de l'abondance du ruissellement et de l'érosion, à l'exception des champs où l'apport d'engrais solubles augmente fortement les exportations. Ainsi, d'une forêt perdant 50 kg/ha/an de terre à un champ de maïs fertilisé (N 120, P 20, K 36), dont l'érosion atteint 90 000 kg/ha/an, les pertes de nutriments passent de 14 à 1 866 kg/ha/an de carbone, de 1,5 à 185 kg d'azote, de 0,1 à 33 kg de phosphore, de 0,8 à 70 kg de calcium, de 0,3 à 35 kg de magnésium et de 0,6 à 54 kg/ha/an de potassium. Il ressort de ces indications que l'érosion en nappe appauvrit sérieusement les champs labourés.

Stocking [82], au Zimbabwe, considérant seulement les pertes en carbone, en azote et en phosphore des parcelles d'érosion pour les principales utilisations des terres du pays, a évalué les pertes en nutriments pour cet État comme équivalant à 1,5 billion de dollars US par an. Sur les champs cultivés, 20 à 50 dollars d'azote et de phosphore sont perdus par érosion, plus que les engrais qu'on y met.

Il ressort de ces évaluations que l'érosion, à côté du drainage, peut jouer un rôle important dans l'appauvrissement en nutriments des sols tropicaux. C'est un motif

supplémentaire pour proposer de lutter contre elle ; cependant, là où les pluies sont abondantes, la réduction du ruissellement peut augmenter le drainage ainsi que les pertes en nutriments solubles comme l'azote. Ce fut le cas au Nord-Cameroun, dans la zone soudanienne de Mbissiri, où le semis direct sous litière d'une rotation coton-maïs a réduit l'érosion de 25 à moins de 5 t/ha/an et le ruissellement de 25 à 10 %, mais a augmenté le lessivage de l'azote au point d'exiger un apport complémentaire de 20 unités d'azote pour redresser la carence des cultures [41].

Pertes en carbone à l'échelle de la parcelle et des versants

De nombreuses données ont été présentées au colloque de Montpellier, en 2002, dédié à l'érosion et à la séquestration du carbone, sur l'importance des pertes de carbone par divers processus d'érosion, sélectifs ou non (érosion linéaire ou en masse), en milieu tropical et méditerranéen. Par rapport à la production de biomasse (1 à 20 t/ha/an), les pertes de carbone particulière par érosion sont modestes et ne représentent que 1 à 50 kg/ha/an en milieu bien protégé (forêts, prairies, savanes, cultures sous mulch ou plantes de couverture), mais peuvent atteindre 50 à 500 kg/ha/an sous cultures labourées sarclées et jusqu'à 2 t/ha/an sur sol dénudé en milieu très agressif sur fortes pentes. Les pertes en carbone soluble par drainage et ruissellement sont peu connues : elles augmentent de 1 à 600 kg/ha/an avec l'importance du volume drainé, du Sahel à l'Équateur. Seule l'érosion en nappe est franchement sélective vis-à-vis du carbone (1,2 à 3 et parfois 10 fois la teneur de l'horizon 10 cm). Là où les rigoles se développent, les pertes en carbone sont dépendantes du volume érodé et des teneurs des dix premiers centimètres du sol. Par rapport à la capacité de séquestration du carbone par les sols (0,1 à 2,5 t/ha/an), les pertes par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur. Par conséquent, le paysan a tout intérêt à développer des systèmes de cultures bien couvrants pour réduire les pertes par érosion en MO et nutriments, améliorer la stabilité des agrégats et augmenter progressivement le stock de carbone dans l'horizon de surface.

Au niveau du versant, le carbone érodé rencontre de nombreux pièges (végétation dense, pentes concaves, sols filtrants, talus, haies vives et autres obstacles filtrants, prairies marécageuses bordant les rivières). Une bonne partie des terres que l'on croyait érodées par les pluies, sont en fait poussées vers le bas des champs par le labour et autres techniques culturales :

cette érosion aratoire décape les sommets des versants et concentre les horizons humifères sur les talus et en bas des pentes concaves. Il s'agit d'un déplacement localisé plus que d'une séquestration du carbone, à moins que cet humus enfoui ne soit plus durable du fait de la diminution de l'aération par les labours [83]. Le pâturage entraîne le tassement de la surface des sols, un ruissellement abondant et du ravinement actif, mais aussi un transfert de la biomasse du parcours vers les champs voisins du lieu de parcage. Plus l'érosion est vive, plus l'incision dans la couverture pédologique est profonde et les sédiments pauvres en carbone.

Dans les petits barrages de Tunisie centrale, la majorité du carbone vient de la végétation et des sols [84]. Dans les grands fleuves, l'essentiel du carbone provient des eaux de drainage et de l'altération des roches carbonatées au silicatées : le carbone particulaire est peu abondant (piégé en amont) et l'humus des sols est rapidement prélevé pour le développement de planctons et algues dans la rivière. Les océans possèdent les plus grandes réserves de carbone de la terre (39 000 GT de C organique et 10 000 GT de carbone inorganique), en face desquelles le flux de carbone érodé sur les sols du continent (1,2 GT) est bien modeste : ces réserves dépendent des équilibres entre le carbone soluble de l'océan et l'oxyde de carbone de l'atmosphère. Les autres puits de carbone (1 500 GT dans les sols et 650 GT dans les arbres) se détériorent par minéralisation, laquelle est encore accélérée par les activités humaines (défrichements, brûlis des résidus de culture, labour et pâturage).

Conclusions et perspectives

La modélisation

On dispose de plus de 1 000 données annuelles de mesure de l'érosion en nappe et rigoles, couvrant une grande diversité de situations agroécologiques de ce vaste continent qu'est l'Afrique. Mais ces données sont dispersées et insuffisamment reliées entre elles et il manque un modélisateur africain, sorte de « Wischmeier local », pour tester et valider les divers modèles proposés [14, 15, 25].

La technologie des mesures de l'érosion : plus complexe ou plus simple ?

Il n'existe pas de méthode de mesure parfaite. Il faut donc choisir un faisceau de techniques adaptées aux problèmes que l'on veut résoudre et aux moyens finan-

ciers disponibles. Ainsi, en Afrique, on est passé de l'interprétation de repères (clous, racines dénudées, pierres) à des mesures fines du ruissellement, des sédiments grossiers qui seront vite piégés, des matières en suspension (MES) et des nutriments qui risquent d'atteindre la rivière et l'océan, sur des parcelles de 100 m², bien adaptées à la variabilité des caractéristiques des terres cultivées et à la disponibilité en personnel technique. Les chercheurs ont fait appel ensuite à des simulations de pluies sur 100 puis 1 m², valables pour définir la dynamique de l'eau, tester la stabilité des agrégats à la battance et comparer le flux de perte en MES. L'étude des ravines, de la circulation des flux d'eau et de sédiments, de leur piégeage sur les versants, reste à développer. Les hydrologues ont observé par ailleurs les flux de sédiments fins sur de nombreux bassins, sans qu'on puisse toujours totalement expliquer les effets d'échelle et les facteurs de risque d'érosion. La cartographie des risques d'érosion tente aujourd'hui de croiser, dans le cadre de bassins spatialisés, divers indicateurs d'état de surface et de stabilité des macro-agrégats validés à l'échelle des parcelles d'érosion [24]. Enfin, divers isotopes permettent de distinguer l'origine des sédiments, les zones d'arrachage, de transport et de dépôt et leur transfert dans les bassins-versants [85].

Les processus d'érosion

La majorité des mesures ayant été faites sur des parcelles plantées chaque année, on dispose aujourd'hui en Afrique de plus de mille résultats annuels d'érosion en nappe (*interrill*) en fonction des sols, des cultures, des pentes les plus courantes et des techniques culturales.

En revanche, on dispose de trop peu de mesures d'érosion linéaire, d'importance majeure en montagne où, sur les versants très pentus, les flux liquides et solides empruntent des chenaux de circulation souvent bloqués par des pierres ou des touffes végétales. On dispose encore moins d'études systématiques de l'érosion aratoire (par les techniques de travail du sol), de l'érosion en masse, des glissements de terrain et du *creeping* qui relaie l'érosion en nappe en montagne.

Validation des méthodes de lutte : des méthodes mécaniques aux approches biologiques

Depuis un demi-siècle, les conservateurs des sols proposent des techniques de lutte anti-érosives mécaniques dont la validation scientifique n'a jamais été faite. On connaît maintenant des exemples de l'échec de ces techniques de terrassement grandes consom-

matrices de main-d'œuvre imposées partout sans vérification de leur efficacité, de leur acceptabilité et de leur rentabilité [86, 87]. Diverses techniques biologiques de LAE ont été testées avec succès sur parcelles (de 100 à 2 000 m²). De ces études, il ressort une grande efficacité pour lutter contre l'érosion et une moindre efficacité, pour lutter contre le ruissellement, qu'il s'agisse de paillage, de fumure organique, de plantes de couverture, de haies vives [39, 40], de semi direct sous litière, surtout où la biomasse est en quantité suffisante pour couvrir au moins 30 % du sol, malgré la place donnée à l'élevage [23, 41]. Mais la conservation des sols pauvres ne suffit pas à améliorer substantiellement la productivité des terres [39, 88]. La fumure organique est très utile, mais souvent carencée en azote et phosphore et surtout pas assez abondante.

Dorénavant, on s'oriente vers des approches biologiques croisées avec la gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments du sol auxquels on ajoute un complément minéral (surtout P et N) pour faire face aux besoins en nutriments des cultures et non pour corriger les carences du sol (pratique qui serait trop chère et trop risquée, car nombre de sols tropicaux retiennent peu les engrais). Même si les méthodes de LAE sont techniquement efficaces, encore faut-il qu'elles soient acceptables pour les petits fermiers bénéficiaires : c'est pourquoi il est important d'étudier les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols, d'appréhender leur répartition dans l'espace écologique et de rechercher l'amélioration de leur efficacité (fertilisation complémentaire, affinage des doses d'irrigation, introduction des activités biologiques permettant la restauration des sols dégradés).

Références

1. Harroy JP. *Afrique terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation*. Bruxelles : Éditions Marcel Hayez, 1944 ; 557 p.
2. Fournier F. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 1967 ; 12 : 5-53.
3. Fauck R, Dugain F. *Érosion et ruissellement en moyenne Guinée. Relations avec les cultures*. Dabala, C.R. II^e Conférence Interafricaine des Sols, 1959.
4. Caintepas JP. *Premiers résultats des mesures de l'érosion en Moyenne Casamance, Sénégal*. C.R. VI^e Congrès AISS, 1956, Paris, tome D : 569-76.
5. Dabin B, Leneuf N. *Étude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire*. Abidjan : Orstom, 1958 ; 20 p.
6. Tricart J. Érosion naturelle et érosion anthropique à Madagascar. *Revue Géol Dynamique Paris* 1953 ; 5 : 225-30.

7. Rougerie G. *Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière*. Dakar : IFAN, 1960 ; 542 p.
8. Sautter G. *Essai sur les formes d'érosion en cirque dans la région de Brazzaville*. Paris : CNRS, 1970 ; Vol. 9, 170 p.
9. Michel P. La dynamique actuelle de la géomorphologie dans le domaine soudanien de l'Ouest africain : exemple du Mali occidental et Sénégal oriental. *Géo-Eco-Trop* 1978 ; 1 : 1-20.
10. Centre technique forestier tropical (CTFT). *Conservation des sols au Sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération, 1979 ; 295 p.
11. Hudson N. *Runoff & soil loss from arable land in Southern Rhodesia*. International Union For the Conservation of Nature, 7th Technical Session, theme 1C, Athens, 1958, 12 p.
12. Hudson N. *Soil conservation*. London : Batsford, 1971 ; 324 p.
13. Hudson N. *Land husbandry*. London : Batsford, 1992 ; 192 p.
14. Roose E. *Vingt années de mesure de l'érosion en petites parcelles en Afrique de l'Ouest*. Travaux et documents Orstom, n° 78. Paris : Éditions Orstom, 1977 ; 108 p.
15. Roose E, Sarraïlh JM. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah Orstom Sér Pédol* 1985 ; 25 : 7-30.
16. Heusch B. L'érosion du pré-Rif (Maroc). *Ann Rech Forestières Maroc* 1970 ; 12 : 1-176.
17. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised RUSLE*. Agricultural Handbook, n° 703. Washington (DC) : USDA, 1997 ; 123 p.
18. Lal R. Soil erosion problems on alfisols Western Nigeria. *Geoderma* 1981 ; 25 : 215-30.
19. Elwell H, Stocking M. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. *Geoderma* 1976 ; 15 : 61-70.
20. Elwell H. Modelling soil losses in Southern Africa : SLEMSA. *J Agric Eng Res* 1978 ; 23 : 117-27.
21. Arabi M, Roose E. Influences des systèmes de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1989 ; 9 : 39-51.
22. Hurni H. *Guidelines for development agents on soil conservation in Ethiopia*. Ministère de l'Agriculture ; CFSCDD, Addis Abeba, Soil Conservation Project, 1986, 100 p.
23. Boli Z, Roose E, Bep a Ziem B, Sanon K, Waechter F. Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux au Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 309-26.
24. Diallo D. *Érosion des sols en zone soudanienne du Sud Mali (BV de Djitiko)*. Thèse doctorat, université de Grenoble I, Géographie physique, 1992, 202 p.
25. Roose E. Introduction à la GCES. *Bull Sols FAO (Rome)* 1994 ; 70 : 420 p.
26. Dumas J. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1965 ; 3 : 307-33.
27. Cormary Y, Mosson JM. Étude de CES au Centre de recherche du génie rural en Tunisie. *Cah Orstom Sér Pédol* 1964 ; 2 : 3-26.
28. Kalman R. *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou, Maroc*. Projet Sebou, 1967, 32 p.
29. Roose E, Asseline J. Mesure de l'érosion sous pluies simulées aux casés d'érosion d'Adiopo-doumé II. Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et sous ananas. *Cah Orstom Sér Pédol* 1978 ; 16 : 43-72.
30. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris : Éditions Orstom, 1989 ; 229 p.
31. Lafforgue A, Naah E. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1976 ; 13 : 195-237.
32. Collinet J, Valentin C. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1979 ; 17 : 283-328.
33. Pontanier R, Moukouri Kuoh H, Sayol R, Seiny-Boukar L, Thèbe B. *Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun*. Yaoundé : Orstom-Ira, 1984 ; 76 p.
34. Blavet D, De Noni G, Roose E, Maïllo L, Laurent JY, Asseline J. Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 2004 ; 15 : 111-20.
35. Laouina A. Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 292-9.
36. Sabir M, Merzouk A, Berkat O. Impact du pâturage sur les propriétés hydriques du sol dans un milieu pastoral aride : Aarid, Haute Moulouya (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 1994 ; 14 : 444-62.
37. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole (GCES). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
38. Duchaufour H, Lebreton M, Bizimana M, Lecuyer J. Aménagement de la ravine de Sagara, Burundi. *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 84-111.
39. Roose E, Ndayizigiyé F. Agroforestry, GCES in Rwanda. *Soil Technol* 1996 ; 11 : 109-19.
40. König D. *Conservation et amélioration des sols dans les systèmes agro-forestiers du Rwanda*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 : 56.
41. Boli Z. *Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord Cameroun*. Thèse université de Dijon, Sciences de la terre, 1996, 343 p.
42. Valentin C, Fritsch, Planchon O. *Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane*. In : « Land development management of acid soils », IBSRAM, Proceeding 4, Bangkok, 1987 : 67-81.
43. Roose E, Sabir M. Stratégies traditionnelles de GCES dans le bassin méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 33-44.
44. Khamsouk B, De Noni G, Roose E. *New data concerning erosion processes and soil management on Andosols from Ecuador and Martinique*. Proceedings ISCO XII, Beijing (China), 2002 ; 2 : 73-9.
45. Charreau C. Influence des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion en Casamance. *Agron Trop* 1969 ; 24, 9 : 836-42.
46. Charreau C, Nicou R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine. *Agron Trop* 1971 ; 26, 9 : 903-78.
47. Diallo D, Barthes B, Orange D, Roose E. Stabilité des agrégats et des mottes comparée aux risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 57-64.
48. Stocking M, Elwell H. Rainfall erosivity over Rhodesia. *Transactions New Series* 1974 ; 1 : 231-46.
49. Stocking M. Examination of the factors controlling gully growth. In : De Boodt M, Gabriels D, eds. *Assessment of erosion*. Chichester (GB) : John Wiley, 1980 : 505-21.
50. Kouri L, Vogt H, Gomer D. Analyse des processus d'érosion linéaire en terrain marneux, bassin de l'oued Mina, Tell oranais, Algérie. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 64-73.
51. Chebbani R, Belaidi S. Étude de la dynamique du ravinement sur deux couples de ravines expérimentales près de Tlemcen. *Bull Réseau Erosion* 1997 ; 17 : 152-60.
52. Collinet J, Zante P. Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 301-19.
53. Naimi M, Tayaa M, Ouzizi S, Choukr-Lah R, Kerby M. Estimation du ravinement dans le BV du Nakhla, Rif, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 232-43.
54. Moufaddal K. Premiers résultats des parcelles d'érosion dans le BV de Nakhla, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 244-54.
55. Tchotsua M. Dynamique et érosion de l'espace urbain de Yaoundé (Cameroun). *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 131-42.
56. Rapp A, Berry L, Temple P. Conclusions from the DUSER soil erosion project in Tanzania. *Geografiska Annaler* 1972 ; 54 a : 377-9.
57. Roose E, Chebbani R, Bourougaa L. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 2000 ; 11 : 317-26.
58. Avenard JM, Roose E. *Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire*. Congrès International de Géographie (Canada), Orstom, 1972, 25 p.
59. Aubert G, Ségalen P. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah Orstom Sér Pédol* 1966 ; 4 : 97-112.
60. Bourgeat F, Petit M. Les lavakas de Madagascar : un agent naturel d'évolution des versants. *Bull Assoc Geogr Fr* 1965 : 29-33.
61. Combeau A. *Érosion et conservation des sols*. Paris : Éditions Orstom, 1977 ; 85 p.
62. Chatelin Y. *Les sols ferrallitiques*. Initiations-Documents n° 20. Paris : Éditions Orstom 1972 ; 225 p.

63. Maignien R. *Étude de quelques bassins-versants en vue de définir un programme de conservation de conservation des sols. Soudan-Haute-Volta-Dahomey*. Paris : Éditions Orstom, 1959 ; 32 p.
64. Segal P. Les sals et la géomorphologie au Cameroun. *Cah Orstom Sér Pédol* 1967 ; 152 : 137-47.
65. Willaime P. *Études pédologiques de Boukombe*. Cotonou : Orstom, 1962 ; 76 p.
66. Global Assessment of soil degradation (GLASOD). *World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory map*. Wageningen (Pays-Bas) : ISRIC, 1990.
67. Fournier F. *Climat et érosion*. Paris : Presses Universitaires de France, 1960 ; 201 p.
68. Asseline J, De Noni G, Chaume R. Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée. *Revue Photo-interprétation* 1999 ; 2 : 3-9.
69. Pieri Ch. *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération du développement ; Cirad, 1989 : 444 p.
70. Brabant P. *La dégradation des terres en Afrique. Afrique contemporaine*, 161. Paris : Documentation française, 1992 : 90-103.
71. Glémarec Y. *Définition d'indicateurs d'environnement pour le développement des hautes terres tropicales*. Thèse de doctorat, Paris 7, 2000.
72. Pouget M. *Étude agro-pédologique de la région d'Ouzera*. Alger : Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), 1974 ; 72 p.
73. Le Landais F, Fabre G. Plan d'aménagement anti-érosif d'un bassin-versant (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 439-43.
74. Al Karkouri J, Laouina A, Roose E, Sabir M. Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah – Rif Central (Maroc). *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 342-56.
75. Sabir M, Maddi M, Naouri A, Barthès B, Roose E. *Runoff and erosion risks indicators on the main soils of the mediterranean mountains of occidental Rif (Marocco)*. Proceedings ISCO XII, Beijing (China), 2002 ; 2 : 370-5.
76. Mouchkane M. Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin-versant du Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 255-80.
77. Brabant P, Darracq S, Egué K, Simmoneaux V. *Togo – État de dégradation des terres résultant des activités humaines*. Collection notice explicative de carte, n° 112. Paris : Orstom Éditions, 1996.
78. Combeau A, Quantin P. *Érosion et stabilité structurale du sol*. Paris : Association internationale des sciences hydrologiques (AIHS), 1962 ; 59 p.
79. Diallo D, Roose E, Barthès B. Comparaison d'un test d'érodibilité des sols et de mesures sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko, Sud-Mali. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 168-75.
80. Roose E, Barthès B. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa : a contribution from French speaking research. *Nutrient Cycling in Agrosystems* 2001 ; 61 : 159-70.
81. Mietton M. Dynamique de l'interface litho-atmosphère : érosion en zone de savane au Burkina Faso. Thèse d'État de géographie, Grenoble, 1988, 511 p.
82. Stocking M. *Quantifying the on-site impact of soil erosion. Land conservation for future generations*. Proceedings Isco V, Bangkok (Thailand), Rimwanich S, éd., 1988 ; 1 : 137-61.
83. Wassmer P. *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Étude de l'érosion des sols et de ses conséquences dans la préfecture de Kibuye*. Université de Strasbourg, UER de géographie, 1981, 156 p.
84. Albergel J, Toufik M, Zante P, Ben Mamou A, Abdeljaoued S. *Matière organique dans les sédiments des barrages collinaires en zone méditerranéenne semi-aride*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 (abstracts) : 41.
85. Huon S, Valentin C. *Isotopic approach of soil organic carbon erosion on two cultivated catchments with steep slopes (Venezuela, Laos)*. Colloque « Land uses, erosion, carbon sequestration », Montpellier, 2002 (abstracts) : 25.
86. Roose E. *Érosion et conservation des sols. Place de la recherche française en régions tempérées et tropicales. Livre jubilaire du cinquantenaire de l'AFES*. Paris : Association française pour l'étude des sols (AFES), 1984 ; 321-34.
87. Roose E. Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone semi-aride méditerranéenne de Tunisie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 130-54.
88. Zougmore R, Ouattara K, Mando A, Ouattara B. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de CES au Burkina Faso. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 41-8.