

# Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive — Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

Éric Roose

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

## Résumé

Toutes les sociétés rencontrent des problèmes de dégradation du milieu par divers types d'érosion et ont tenté d'y porter remède par des stratégies traditionnelles adaptées aux pressions foncières, en aménageant les eaux de surface pour améliorer la productivité des sols et stabiliser les versants. Leur abandon ne signifie pas leur manque d'efficacité antiérosive, mais l'évolution du milieu socio-économique.

Depuis l'ère industrielle, les États centralisés ont dépêché leurs ingénieurs en milieu rural pour tenter de réduire les nuisances de l'érosion sur la qualité des eaux de surface et la protection des équipements industriels ou urbains. À l'occasion de crises économiques et environnementales, ont été créées des stratégies d'équipement en petite hydraulique agricole : la restauration des terrains de montagne (RTM), en 1850, dans les Alpes et Pyrénées, la conservation de l'eau et des sols (CES), en 1930, dans la Grande Plaine américaine, puis la défense et restauration des sols (DRS) (1940-1980), dans les montagnes qui entourent la Méditerranée. Au séminaire de Porto Rico (1987) furent étudiées les multiples causes des échecs des projets comportant un important volet de lutte antiérosive (LAE) : les causes essentielles de l'abandon des structures mécaniques furent l'absence de participation des bénéficiaires et leur inefficacité sur la productivité des terres. Une nouvelle stratégie (*Land husbandry* ou GCES) fut donc proposée qui tente de mieux prendre en compte les préoccupations immédiates des paysans : assurer leur survie, en valorisant la terre et le travail. C'est une véritable révolution pour les conservationnistes, qui entraîne une modification des priorités : 1. D'abord améliorer la gestion des bonnes terres qui réagissent le mieux aux investissements avant de s'occuper « des terres mortes » d'où s'échappent beaucoup de sédiments. 2. Engager un dialogue entre les techniciens et les paysans dès le début des projets sur la perception par les paysans des problèmes d'érosion et de leurs solutions. 3. Rechercher de nouveaux systèmes de production en vue d'une gestion plus rentable et plus durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. 4. Confier à une équipe spécialisée de l'État, le traitement délicat de l'érosion catastrophique (ravines, mouvements de masse, inondations et aménagement des rivières), mais responsabiliser les paysans sur l'amélioration de l'environnement rural. L'auteur présente enfin l'évolution des techniques de LAE en Afrique depuis la colonisation et rapporte les tendances actuelles dégagées lors du colloque de Yaoundé sur « l'homme et l'érosion ». D'une part, l'influence de l'érosion est très néfaste sur la productivité des terres, mais, d'autre part, la recherche développe des méthodes de lutte antiérosive simples et efficaces et propose des techniques pour restaurer la capacité de production des sols dégradés suffisamment épais.

*Mots clés : Lutte antiérosive ; Historique.*

## Summary

### *Evolution of soil and water conservation strategies — Towards land husbandry*

Faced with the damages caused to the environment as a result of erosion, man has long tried to reduce them through traditional strategies adapted to land pressure and geared to improving water control for a better soil fertility and productivity. The fact that they have been dropped does not mean that these strategies are not efficient, but simply that they are no longer adapted to today's socio-economic conditions. From the mid-1850s onwards, centralised governments started sending their engineers to the countryside with a view to reduce the damages to the quality of the water and to industrial or urban equipments erosion brought in its stride. Parallel to a series of economic and ecological crises, agricultural hydraulic equipment strategies were gradually designed : soil restoration in mountain terrains (RTM, restauration des terrains de montagne) in 1850, in the Alps and the Pyrenees ; soil and water conservation (SWC) during the 1930 Great Plain crisis in the United States ; and soil and defence restoration (DRS, défense et restauration des sols), from 1940 to 1980 in the mountains of the Mediterranean. Analysing the various reasons for the failure of SWC-based projects, the Porto Rico workshop of 1987 pointed out to the non-involvement of the farmers in the decision-making process as well as to the inefficiency of the techniques proposed to improve soil productivity. A new strategy (land husbandry) was proposed that would better take into account the vital problems of the farmers, i.e. how to survive while making the best possible use of land and labour. To soil conservationists, this was a revolution entailing a redefinition of priorities : i) first of all, improve the management of the « best » land to increase farmers' benefits and then deal with the « bad » lands which produce most of the sediments ; ii) second, initiate a participative approach bringing together technicians and farmers, right from the beginning of a project, so as to find out how farmers perceive erosion problems and how these can be best dealt with ; iii) develop new farming systems for a more cost-effective and more sustainable water, biomass, and soil fertility management ; iv) let government-appointed specialists tackle catastrophic erosion damages (torrential gullies, landslides, floods and river control) while letting farmers be responsible for improving the rural environment. As a conclusion to this paper, the evolution of erosion control techniques in Africa from the colonial period till the « Man & Erosion » Colloquium held in 2000 in Yaoundé, is presented. Research has demonstrated the tremendously negative impact of sheet erosion on topsoil fertility, but it has also shown the possibility to restore and even improve soil productivity using simple techniques such as direct drilling under litter or under leguminous cover. Organic matter control must be complemented by mineral nutrient to be combined with SWC techniques in order to enhance soil and labour productivity.

*Key words: Erosion control Strategies; Historical Highlights.*

## Diversité des causes physiques et humaines de l'érosion

Au commencement du monde, la terre et l'eau étaient intimement liés : de cette union est née toute vie. C'était il y a 4,5 milliards d'années. Mais leur histoire allait connaître deux séries de crises, l'une géologique, et l'autre, beaucoup plus tardive, d'ordre démographique.

D'une part, quand la terre a commencé à migrer en plaques, elle a provoqué la création de montagnes et des cycles d'érosion active (phase de rhexistasie de la théorie d'Erhart [1]) suivis de périodes d'« érosion normale » ( $E = 0,1 \text{ t/ha/an}$ ) où le décapage moyen ne dépasse pas 1 mètre en 100 000 ans, sous un couvert naturel. De ces alternances entre morpho-

genèse et pédogenèse sont nés les paysages et les sols que nous rencontrons aujourd'hui.

D'autre part, ce n'est que beaucoup plus tard que les hommes et les animaux se sont multipliés au point de couvrir la majorité des terres arables. Le squelette de « Lucie » ne date que de 15 millions d'années et les grandes agglomérations de quelques siècles. Ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle que l'Afrique a connu une croissance démographique formidable : la population a doublé tous les 25 ans, ce qui a entraîné des problèmes socio-économiques et environnementaux sans précédent. L'augmentation des besoins vitaux et sociaux a entraîné l'extension des défrichements pour les cultures et l'intensification du pâturage qui, à leur tour, ont déclenché « l'érosion accélérée » ( $E = 10 \text{ à } 700 \text{ t/ha/an}$ ) et le

ruissellement exacerbé (il passe de 1 % sous végétation naturelle à 25 % sous cultures sarclées et peut dépasser 75 % lors des plus fortes averses). En une génération (25 ans), l'érosion peut décaper l'horizon humifère et causer l'abandon de la terre. Mais il arrive que l'érosion se développe encore plus vite. On parle « d'une érosion catastrophique » quand l'homme développe ses activités sur des terres particulièrement fragiles. Les paysages méditerranéens peuvent rester stables pendant des années, jusqu'à ce qu'une averse rare sature le sol et provoque des ravinements (100 à 300 t/ha/jour) ou pire, des glissements de terrain (plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de boue en une heure) et des inondations brutales. En octobre 1999, dans l'Aude, département du sud de la France, il est tombé près de 500 mm en 2 jours inon-

dant tout un département (35 morts et des milliards de dégâts) : toute l'économie a été désorganisée par une seule averse tombant dans une zone méditerranéenne, montagneuse, viticole et peu couverte. Les pluies cévennoles causent régulièrement leur cortège de dégâts à l'automne, quand la masse d'air chaud et humide de la Méditerranée rencontre un front froid venu du nord : exemple, le 28 octobre 1988, à Nîmes, il est tombé 650 mm en 6 heures, et le 9 septembre 2002, à Sommière, dans le Gard, 600 mm en deux jours.

En définitive, l'érosion reste encore mal connue et surtout mal maîtrisée, car elle est discontinue dans le temps et dans l'espace. Les processus, les causes et les facteurs déterminant l'érosion étant très variables, il n'y a pas de recette généralisable de lutte antiérosive. Il ne s'agit pas seulement d'un simple problème technique ; l'érosion c'est aussi le signe de la dégradation d'une société en mutation. La presse et les politiciens se mobilisent lors des catastrophes, mais négligent le travail de sappe des éléments qui, pluie après pluie, préparent les drames [2].

Dans cette synthèse seront présentés une analyse historique de l'évolution des stratégies de lutte contre l'érosion accélérée par les activités humaines dans le monde, un exemple de recherche en Algérie sur la nouvelle approche (GCES), puis l'évolution des techniques antiérosives en Afrique, et enfin, le bilan des nouvelles tendances telles qu'elles ont été exprimées au colloque international de Yaoundé en décembre 1999.

## La mondialisation, une époque favorable aux remises en cause

### L'érosion accélérée et la pression démographique

En agglomérant les peuples dans les villes, chaque civilisation a créé des conditions favorables au développement du ruissellement, à l'accélération de l'érosion et de la dégradation de la fertilité des sols. Les villes et les routes sont des milieux peu perméables qui accumulent les volumes ruisselés, accélèrent le ravinement, provoquent des inondations et des dépôts de boues. La demande urbaine en vivres entraîne l'extension des cultures sur des terres plus fragiles, l'intensification des techniques culturales et l'augmentation des risques de dégradation des sols.

L'opinion générale pense qu'il y a des liens étroits entre la dégradation du milieu et la densité démographique (projet Glasad) [3]. Cependant, on a observé qu'une diminution de la population, suite à l'émigration, ne réduit pas forcément l'érosion :

le manque de main-d'œuvre pose des problèmes d'entretien des paysages et des dispositifs de gestion des eaux.

Certains pensent, au contraire, que plus la main-d'œuvre est abondante, plus les terres sont soignées et les risques d'érosion réduits (« *more people, less erosion* »). C'est le cas dans le pays bamileke au Cameroun [4], à Madagascar [5], ainsi qu'au Kenya [6], ou dans le midi de la France [7], où les terrasses ne sont plus entretenues car le travail est mieux rémunéré en ville.

Le schéma de la *figure 1* montre que la relation entre la densité de la population et l'érosion n'est pas linéaire. En Afrique, Roose [8] a observé des états de crise environnementale pendant laquelle la vie est si dure que la population est obligée de choisir entre l'émigration vers des lieux plus cléments, ou la modification du système de production légué par les ancêtres. Il s'en suit une alternance de périodes de crise et de périodes plus stables, où se succèdent des systèmes de production adaptés à chaque situation foncière. A chaque stade, correspond un mode de gestion des ressources en eau, en bois, en énergie, en nutriments, en bétail, en cultures. On part d'un milieu naturel riche en diverses ressources qu'on exploite et épuise progressivement, avant de réintroduire des ressources artificielles.

### Face aux crises d'érosion, deux logiques

Pour surmonter ces crises, les sociétés ont développé des stratégies de lutte antiérosive en fonction de deux logiques [9] :

- *une logique amont partagée par les paysans*, dont l'objectif est d'améliorer la productivité de la terre et du travail, en adaptant les systèmes de production et en développant des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau sur le versant, en concentrant la biomasse et la fertilité sur les terres cultivées, et en protégeant les sols contre divers types d'érosion.

- *une logique aval, partagée par les consommateurs d'eau, les citadins et les industriels*. Leur objectif est de protéger la qualité des eaux et les aménagements. Pour le bien public, le pouvoir central envoie ses ingénieurs pour imposer dans les campagnes des équipements hydrauliques (barrages, terrasses, banquettes, drains) dont l'objectif principal est de réduire les transports solides et de protéger la qualité des eaux et les équipements (aménagement des vallées, réseau routier, ouvrages d'art et villes).

### Un monde en pleine mutation économique

La mondialisation qui provoque actuellement la restructuration de l'économie, en-

traîne à sa suite une crise sociale et environnementale : c'est une époque de remise en cause favorable à l'évolution des mentalités et à la réflexion sur la gestion des ressources au niveau du terroir, des régions et des ensembles de régions.

## Évolution des stratégies antiérosives dans le monde

Toutes les civilisations ont rencontré des problèmes de dégradation des terres : devant ces crises, les hommes ont réagi selon les conditions socio-économiques de leur époque [8].

### Stratégies traditionnelles liées aux conditions climatiques et économiques

Depuis 7 000 ans, l'homme a accumulé des vestiges de sa lutte pour maîtriser les différentes formes d'érosion et améliorer la gestion de l'eau sur les versants et la fertilité des sols [10]. L'analyse de la répartition spatiale des systèmes de lutte et des causes de leur disparition montre que l'efficacité des méthodes traditionnelles est strictement liée aux conditions économiques des sociétés où elles se sont développées.

Deux exemples illustreront cette hypothèse.

- *La culture itinérante sur brûlis* est probablement la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre et du travail [11-13]. Pour que ce système reste équilibré (brève culture sur brûlis de la biomasse, suivie d'une longue jachère), il faut une réserve de terre considérable (10 à 20 fois la surface cultivée) et une économie d'auto-subsistance. Cette stratégie ne s'applique que sur des terres peu peuplées (moins de 20 à 40 habitants au kilomètre carré, selon la productivité régionale), suffisamment profondes et arrosées. Dès que les besoins vitaux et la pression foncière augmentent, la durée de la jachère diminue et le système commence à se dégrader : c'est le cas au Sahel et dans le Rif (Maroc).

- À l'opposé, se sont développées les *terrasses en gradins irrigués* (2 000 ans avant J.-C., en Asie) et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres (1 000 ans après J.-C., en Crète), là où la population est dense, les terres cultivables rares et le travail bon marché. Comme ces aménagements exigent un gros effort pour la construction des terrasses (700 à 1 200 hommes.jours.ha<sup>-1</sup>), pour l'entretien des talus et la restauration de la fertilité des sols remués, il faut que la production soit rentable ou vitale. Ces améliorations foncières ne sont acceptées

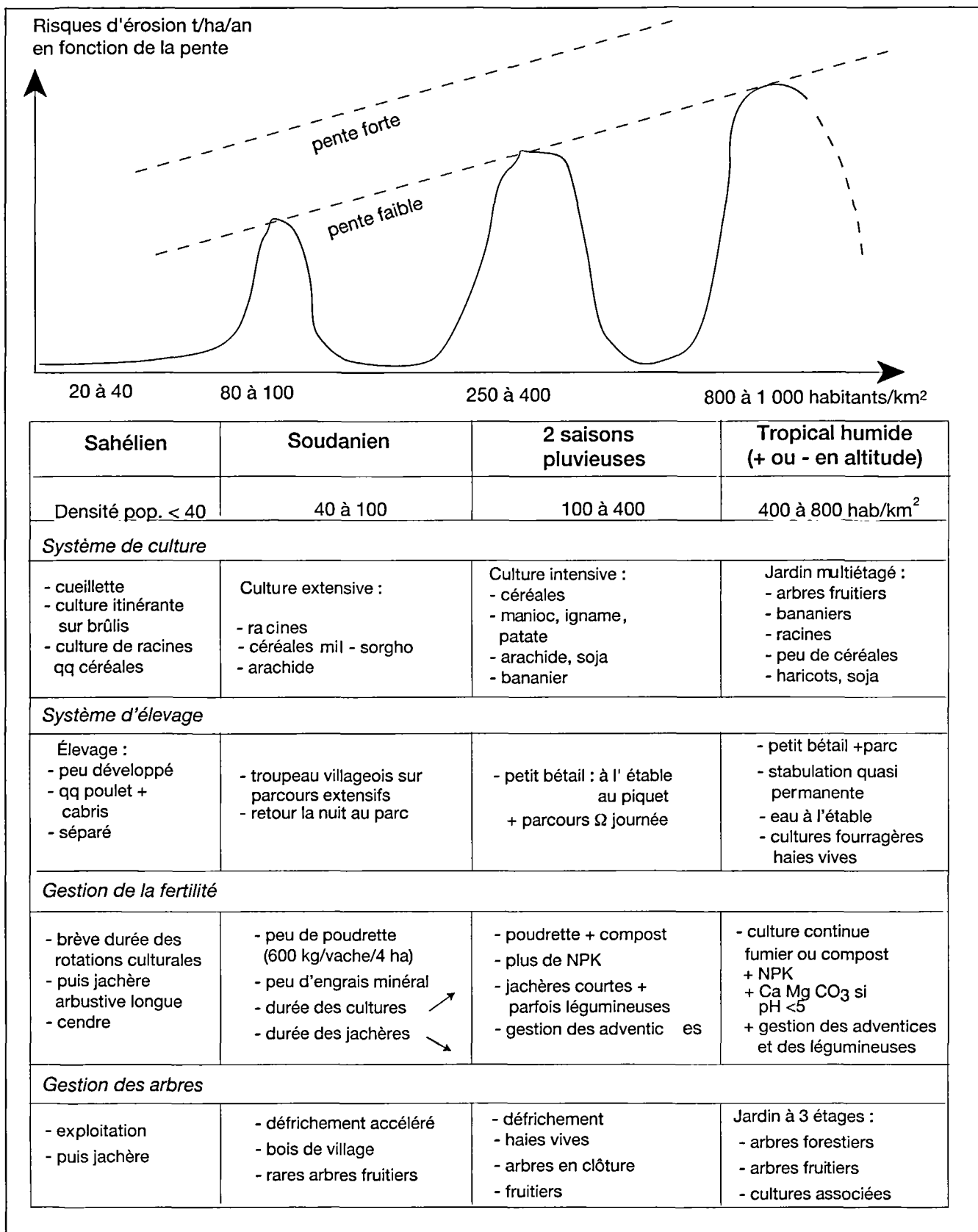


Figure 1. Relation entre la densité de la population, l'érosion, le système de culture, le système d'élevage et la gestion de la fertilité. Ce schéma adapté à l'Afrique devra être nuancé en fonction de la fréquence des pluies, de la pente et des potentialités des sols (d'après [8]).

que là où les paysans n'ont plus d'autre choix pour subsister (pressions foncières, militaires, religieuses ou économiques) ou pour produire des cultures particulièrement rentables (fleurs à Nice ou cannabis dans le Rif).

Mais actuellement, la mécanisation de l'agriculture, les salaires dans l'industrie, la crise économique, le coût de la main-d'œuvre, l'émigration et la désintégration des sociétés traditionnelles entraînent l'abandon de la plupart de ces techniques anciennes, décrites par les ethnologues, mais méprisées par les technocrates [14]. Ce n'est pas parce qu'elles sont inefficaces que ces techniques sont abandonnées, mais à cause du changement des conditions socio-économiques ou démographiques. En un siècle, la population a quintuplé, malgré les guerres, et les besoins sociaux ont augmenté plus vite encore.

### Stratégies modernes d'équipement des montagnes : la logique de l'État

À l'occasion de graves crises sociales se sont développées des stratégies modernes d'équipement hydraulique des montagnes. Il s'agit essentiellement de reforestation des hautes vallées, d'améliorations foncières, de correction des torrents et ravins et de terrassement des terres cultivées sur fortes pentes. La priorité a été donnée à la réalisation de gros chantiers de terrassement et de reforestation.

- La restauration des terrains en montagne (RTM) a été développée en France dans les années 1850, pour faire face à la crise d'érosion due aux montagnards qui ne pouvaient survivre sans mener leurs troupeaux sur les terres communales déjà surpâturées. La dégradation des couvertures végétales et le tassement des sols par le bétail ont entraîné le développement catastrophique des torrents. Pour protéger les vallées aménagées et les voies de communication, l'Office national des forêts a racheté les terres dégradées, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents [9].

- Aux États-Unis d'Amérique, le Service de conservation de l'eau et des sols (CES ou SWC en anglais) a été créé lors de la terrible crise de 1930, pour conseiller les fermiers volontaires qui demandaient aux agronomes un appui technique et financier pour lutter contre l'érosion. En effet, l'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes (coton, arachide, maïs) dans la Grande Prairie a déclenché une érosion éolienne catastrophique. Des nuages de poussières obscurcirent le ciel en plein jour (*dust bowl*) : 20 % des terres cultivables furent dégradées à cette époque. Sous la pression de l'opinion publique, l'État dut réagir et mit en place simultanément un programme de recherche et

un service de conservation de l'eau et des sols (SWC Service) au niveau de chaque comté.

Deux écoles s'affrontent encore de nos jours sur l'approche des problèmes de LAE :

- l'une, sous l'impulsion de Bennet [15] organise la lutte antiérosive (LAE) autour des moyens mécaniques de réduction de la vitesse et de l'énergie du ruissellement pour réduire le ravinement (invention des terrasses de diversion du ruissellement vers des exutoires enherbés, technique validée uniquement sur les sols argilo-limoneux) ;

- l'autre, à la suite des travaux de Ellison [16] sur la battance des gouttes de pluie et des équipes de Wischmeier et Smith [17], organise la LAE en modifiant les systèmes de culture pour absorber l'énergie des pluies sur les champs en améliorant le couvert végétal [18] et la rugosité de la surface du sol. Pour réduire le ruissellement dès son origine, la LAE s'intéresse cette fois au développement de la couverture végétale, à la gestion des résidus de culture et aux techniques culturales conservatrices.

- La défense et restauration des sols (DRS) a été développée par les forestiers dans les années 1940-1980 autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages (en 30 à 50 ans) et à la dégradation des équipements et des terres. La DRS est née d'un mariage de raison entre la RTM des forestiers (reforestation des hautes vallées, correction torrentielle) et la CES des agronomes (banquettes plantées d'arbres fruitiers). Pour les forestiers, il s'agissait avant tout de mise en défens des terres dégradées par la culture et le surpâturage, de reforester les hautes vallées pour restaurer par les arbres la capacité d'infiltration des sols dégradés. « Tous les problèmes ne naissent-ils pas du surpâturage et du défrichement abusif ? » [19-21].

Cependant, depuis les années 1975, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches technocratiques menées trop rapidement, sans l'avis des « bénéficiaires ». Aux États-Unis, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de CES et les millions de dollars investis chaque année, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an de sédiments (limite de tolérance pour les sols profonds) qui viennent polluer les eaux des barrages [22, 23]. Si la fréquence des vents de sable a été réduite aux États-Unis, la pollution des eaux, les inondations et l'envasement des barrages posent encore aujourd'hui de graves problèmes. En Algérie, malgré 800 000 hectares de reforestation (ceinture verte) et l'aménagement de banquet-

tes sur 350 000 hectares cultivés, la dégradation de la végétation et des sols continue, l'envasement des barrages et le manque de bois restent des problèmes préoccupants. En Afrique de l'Ouest et du Nord, des paysans préfèrent parfois abandonner leurs terres aménagées par l'État plutôt que d'entretenir les banquettes anti-érosives car ils craignent qu'il ne s'agisse d'un piège dressé par l'Administration pour s'emparer de leurs terres [24]. Les paysans ont vite constaté que ces banquettes faisaient perdre 5 à 15 % des surfaces cultivables, sans augmenter pour autant les rendements des parcelles restantes : celles-ci continuent d'ailleurs de se dégrader du fait de l'érosion en nappe. On comprend que les paysans se méfient des projets de LAE qui leur causent plus de gênes que de bénéfices. « Pourquoi fournir tant d'efforts, pour si peu de bénéfice sur la production ? »

### La GCES, une stratégie participative visant à mieux gérer les ressources en eau, en biomasse et en nutriments

Au séminaire de Porto Rico [25], furent analysées les causes de l'échec ou de la réussite des projets englobant un large volet de LAE. Une nouvelle stratégie y est née, qui tient mieux compte des besoins immédiats des paysans et des éleveurs. Elle tente de résoudre leurs problèmes immédiats : valoriser la terre et le travail des ruraux en améliorant le système de culture, en particulier, l'infiltration de l'eau, l'enracinement et la nutrition des plantes.

Cette approche a été nommée « *Land husbandry* » par les anglophones [26, 27] et « *Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols* » (GCES) en français [8, 28].

Partant du principe que les aménagements antiérosifs ne peuvent être durables sans la participation paysanne, cette stratégie tient compte de la façon dont les ruraux perçoivent les problèmes de dégradation des sols et propose l'intensification de la productivité des terres pour faire face à la croissance démographique. En effet, le défi à relever est de doubler la production en 20 ans, tout en réduisant significativement les risques de ruissellement et d'érosion. Il s'agit d'intégrer la mentalité paysanne pour laquelle tout effort doit être payé de suite. Il n'est plus acceptable de proposer des travaux lourds de conservation des sols sur les terres ravonnées, d'une part parce que bien des sols tropicaux cultivés sont déjà épuisés (il est trop tard pour les conserver : il faut restaurer leur potentiel de production) et, d'autre part, parce que la demande de produits de consommation ne peut plus attendre d'hypothétiques effets à long terme : la population rurale est trop pauvre et il faut répon-

dre à sa préoccupation immédiate (sa survie).

Les résultats récents ont bien montré qu'il ne suffit pas de réduire le ruissellement et de conserver l'épaisseur des sols pour intensifier, ou même maintenir, la productivité des terres [29]. De même, tenter de restaurer les propriétés primitives des sols ne nous paraît pas raisonnable, car le temps à patienter et le prix à investir sont trop élevés et peu rentables : en effet, les sols tropicaux vierges ne sont pas forcément riches et fertiles. Mieux vaut donc améliorer l'état structural de l'horizon où vivent les racines et nourrir directement les cultures. Les terrassements exigent des travaux considérables pour leur mise en place (de 750 à 1 200 jours de travail/ha) et leur entretien (10 à 40 jours/ha/an), mais ils n'ont pas amélioré la productivité des sols ni même réduit leur vitesse de dégradation : l'érosion en nappe et rigoles n'est pas interrompue par les fossés et autres terrasses. En revanche, on peut observer que les fossés accélèrent la concentration des eaux de surface dans les drains naturels (développement de ravines) et dans les rivières, et ils provoquent généralement une recrudescence de l'érosion des berges en fonction des nouveaux débits de pointe [30].

Dans le cadre de la GCES, la nouveauté consiste justement à gérer au mieux les terres productives, l'eau, la biomasse et les nutriments essentiels au développement harmonieux des cultures. L'intensification de la production augmente la couverture végétale, la biomasse racinaire et les résidus de culture, l'activité de la faune perforatrice du sol et la rugosité de la surface des champs : elle réduit indirectement les risques de ruissellement et d'érosion. La lutte antiérosive cesse d'être une fin en soi : elle fait partie du paquet technologique qui permet d'assurer la gestion durable de la couverture pédologique.

Les stratégies d'équipement ont concentré leur priorité sur l'aménagement des terres les plus dégradées, d'où proviennent la majorité des sédiments qui polluent les eaux indispensables aux consommateurs des villes. En créant des banquettes sur les plus mauvaises terres, on ne réduit pas les causes de l'érosion. Les enquêtes en Haïti ont montré que les paysans préfèrent investir d'abord dans leurs terres productives pour tirer le meilleur revenu de leur améliorations foncières. « Mieux vaut prévenir que guérir » et l'expérience de 50 ans de CES plus DRS a montré que l'on n'arrive pas à éteindre les foyers d'érosion.

En conclusion, on ne dispose que d'une douzaine d'années d'expérience en matière de GCES, mais cette stratégie a montré de grandes potentialités dans des régions très variées, du nord de la France

[31] au Sahel [32], des savanes soudanaises [33] aux montagnes tropicales du Rwanda [29], du Burundi [34], d'Haïti [35], des montagnes méditerranéennes [36] aux zones volcaniques de l'équateur [37].

Cette approche interpelle les paysans car elle s'appuie sur les techniques traditionnelles et exige leur conviction et la recherche en commun de solutions adaptées au diagnostic local et aux possibilités économiques de chacun. Elle valorise les capacités d'innovation des chercheurs et des paysans. Elle exige du temps, car il faut changer la mentalité d'assistés en volonté de prise en charge communautaire de l'environnement rural. Cela peut poser des problèmes avec les bailleurs de fonds qui souhaitent voir des transformations rapides du paysage en quelques années. C'est encore un vaste domaine de recherche, car la diversité des systèmes de production, des problèmes économiques et des milieux physiques est infinie. De plus, on est loin de connaître la diversité des paramètres modifiant l'intensité ou même le type d'érosion, ou l'efficacité des techniques antiérosives sur le rendement des cultures et des associations de cultures. En définitive, on peut distinguer deux domaines dans la LAE : celui de l'État qui continue à financer la RTM et les catastrophes naturelles et, par ailleurs, celui de la gestion du terroir qui est du ressort des paysans qui peuvent adapter leurs systèmes de production.

## Exemple de GCES en moyenne montagne méditerranéenne d'Algérie

### Le défi algérien des années 1985-1995

Depuis les années 1950, des pressions démographiques et socio-économiques ont contribué à développer une sévère dégradation de la couverture végétale, des sols et du réseau hydraulique des montagnes septentrionales de l'Algérie. Les processus en cause sont multiples : défrichement des pentes fortes pour étendre les cultures vivrières, surpâturage et feux dans les forêts méditerranéennes, faibles restitutions et minéralisation rapide des matières organiques du sol. L'érosion est partout présente : érosion en nappe sélective des particules fines les plus fertiles, décapage de l'horizon humifère par formation de rigoles et surtout par décapage mécanique par les outils de travail du sol ( $E = 10$  à  $50$  t/ha/an), ravinement très actif lors des averses de fréquence rare tombant sur des sols nus, travaillés

et/ou saturés (100 à 300 t/ha/an), glissements de terrains argileux, marneux ou schisteux, déstabilisation des berges par les oueds et des versants par le réseau routier.

Le défi en 1985, période de récession industrielle, est de maintenir une population croissante en zone rurale, d'intensifier la production agricole et l'élevage en montagne semi-aride, tout en protégeant la qualité des eaux de surface et les barrages indispensables pour l'alimentation en eau potable des villes en forte croissance.

### La recherche en coopération entre l'INRF et l'Orstom

Les directeurs de l'Institut national de recherches forestières d'Algérie (INRF) et de l'Institut de recherche pour le développement (IRD-ex-Orstom) ont uni leurs moyens pour développer un programme de recherche sur la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols qui se décline en trois sous-programmes : enquête sur l'efficacité des aménagements antérieurs de DRS, quantification des processus d'érosion et aménagement de trois micro-bassins cultivés.

En dix ans, une douzaine de chercheurs algériens et français ont réalisé une enquête sur l'état actuel des 350 000 hectares aménagés par l'administration des Forêts, ont participé à l'aménagement d'une douzaine de ravines et micro-bassins-versants et installé un réseau de dispositifs de mesure du ruissellement et de l'érosion (50 parcelles d'érosion de 100 à 200 m<sup>2</sup> dans les champs paysans) dans le nord de l'Algérie (régions de Tlemcen, Mascara et Médéa). Ce sont les résultats des parcelles de Médéa dont nous donnons brièvement les résultats [36, 38].

Ces parcelles aménagées au milieu des champs paysans reflètent la variabilité des sols (rouges fersiallitiques, bruns calcaires, vertisols gris, lithosols) sur pentes fortes (12 à 40 %), sous divers systèmes de production : système céréalier, arbres fruitiers, vigne, et silvo-pastoral. Les pluies varient de 300 à 600 mm selon les années et les sites. Sur chacun des sites furent comparés une parcelle nue en jachère travaillée (témoin universel du modèle USLE (*Universal Soil Loss Equation*) de Wischmeier et Smith [17]), un système traditionnel (témoin cultivé régional) et deux parcelles améliorées soit par l'apport d'engrais adapté au niveau de production souhaité, soit par l'introduction de rotations de cultures complémentaires (céréales/légumineuses), travail adapté du sol (pas trop fin pour éviter la battance), pesticides et semences améliorées.

## Quelques résultats des mesures

• Les pluies ont été déficitaires (250 à 550 mm/an) et peu agressives (érosivité  $R = 20$  à 50), mais on a pu observer quelques événements de fréquence rare (80 à 150 mm/jour) dans ces versants semi-arides.

• Les coefficients de ruissellement annuels moyens sont faibles : 10 à 18 % des pluies pour les jachères nues, 3 à 12 % pour les cultures vivrières traditionnelles et à peine 1 % pour les systèmes améliorés. Lors des averses les plus importantes, le coefficient de ruissellement maximal atteint 34 à 80 % sur sol nu, 26 % sous témoin local et 3 à 9 % sous culture améliorée. Il y a donc des méthodes culturales intensives qui peuvent réduire le ruissellement à des proportions raisonnables. Mais lorsque de longues averses abondantes et intenses tombent sur des sols peu couverts ou encroûtés, le ruissellement dévale avec beaucoup d'énergie et ravine les versants.

• L'érosion en nappe et rigoles reste modérée : 2 à 20 t/ha/an sur sol rouge nu, 0,1 à 2 t/ha/an sous système régional, et moins de 0,1 t/ha/an sous système amélioré.

• Le ravinement, mesuré par le suivi de sections transversales, varie de 90 à 300 t/ha/an [39].

## Discussion

• Ces résultats confirment ceux que Heusch [40] a trouvés jadis dans le pré-Rif marocain, à savoir que l'érosion en nappe est modeste et le ravinement cent fois plus fort, que la position topographique est parfois plus importante que l'inclinaison de la pente, d'où l'érosion linéaire remontrante, en particulier lorsque l'oued vient saper les berges.

• L'érodibilité des sols est réduite à cause de la présence de cailloux, d'une texture argileuse et d'argile saturée en calcium, donc stable. Les sols rouges fersiallitiques sont plus fragiles que les sols bruns et que les vertisols gris. Cela explique les paysages pentus qui ont bien résistés à l'agressivité des pluies.

• La couverture végétale des systèmes de culture a une forte action sur la réduction des risques de ruissellement et d'érosion, même lors des averses abondantes. On peut donc réduire efficacement les risques d'érosion en abordant en priorité ce facteur par l'intensification des cultures. Autrement dit, ce n'est pas la saturation du sol qui est la cause principale des transports solides, mais bien l'énergie des pluies plus ou moins bien interceptée par la litière et le couvert végétal : d'où l'intérêt de travailler les systèmes culturaux couvrant le sol plutôt que les fossés et autres drains capables de réduire la saturation du sol.

Tableau 1. Revenus nets en fonction des systèmes de production dans la région de Médéa (d'après [38]).

Systèmes de production	Revenus nets (\$/ha /an)
Parcours extensif dans les bois communaux	25 \$
Blé traditionnel, suivi d'une jachère pâturée	125 \$
Vignoble traditionnel pour fruits de table	500 \$
Rotation céréale blé/légumineuses (pois, lentilles, fèves.)	1 500 \$
Vignoble ou fruitiers intensifs avec rotation intercalaire	3 000 \$

• Enfin, le plus important pour les ruraux, c'est l'amélioration sensible des rendements des cultures en grains et en pailles (qui intéressent l'élevage). Le rendement du blé en grains sur des parcelles adjacentes est passé de 7 à 48 quintaux à l'hectare et la paille de 2 à 20 quintaux/ha/an en fonction de l'effort d'intensification. Plus le système de culture est intensif, plus il est productif et moins il perd d'eau, de matière organique (MO) et de terre riche en nutriments. Mais c'est le revenu net qui intéresse en définitive le paysan, une fois soustrait le coût des intrants (mais pas du travail). La comparaison des systèmes de production montre qu'il est largement gagnant (tableau 1).

On comprend dès lors que les paysans aient défriché les parcours pour produire des céréales, puis des fruitiers et enfin ont modifié d'eux-mêmes leur système de production, tout au moins avant les troubles dans la région de Médéa. Les vieux paysans nous ont d'ailleurs confirmé que les anciens pratiquaient déjà la culture intercalaire sous fruitiers (oliviers, figuiers et amandiers) : il leur manquait les engrais minéraux complémentaires et les variétés améliorées de semences valorisant les apports d'intrants.

D'autres exemples de recherche pourraient confirmer l'importance des systèmes de cultures intensives et couvrantes sur le ruissellement (Rishirumhirwa sous bananiers au Burundi [34], Boli au Cameroun [41]), mais c'est à Médéa que l'on a le mieux étudié les effets économiques de la maîtrise du ruissellement et de l'érosion à l'échelle du champ paysan.

## Évolution des techniques de lutte antiérosive en Afrique

### Avant la colonisation occidentale

De nombreuses techniques traditionnelles de lutte antiérosive ont été décrites par les géographes, agronomes et autres administrateurs des colonies au Congo belge [11, 42, 43], ou plus récemment [El Amami en Tunisie [44] ; Critchley *et al.*, [14] ; Reij *et al.*, [45] ; Roose en Afrique

occidentale [46] ; Roose, Sabir et De Noni en zone méditerranéenne [7]]. Signalons ici les techniques traditionnelles les plus connues :

– la culture itinérante sur brûlis [12, 13, 47] ;

– les techniques culturales permettant de maîtriser l'eau, les adventices et la fertilité des sols comme les diverses variétés de billonnage et de buttage [8] ;

– les divers modes de culture sous impluvium qui tentent de gérer le ruissellement : microbassins du Neguev [48], *tabias*, citernes et *jessour* du Maghreb [44, 49, 50], *zaï* dans la zone soudano-sahélienne du Burkina, Mali, Niger, Tchad, Madagascar [46, 51] ;

– les haies vives défensives au Cameroun [52], au Rwanda [29] et en Guinée [53] ;

– les terrasses progressives au Cameroun [52, 54], au Burkina et Rwanda [29, 30] ;

– les terrasses en gradins (pays dogon au Mali [55] et Maghreb [7, 45, 56]) ;

– les paysages agroforestiers de la zone soudano-sahélienne : *Acacia albida*, *Karite*, *Nere* ([57]) et les arganiers du Sud marocain.

Une grande diversité de systèmes traditionnels ont été développés autour du désert pour capter les eaux de surface et de profondeur [44, 46, 58, 59].

### L'époque coloniale

Les colonisateurs occidentaux ont imposé leurs stratégies de DRS ou CES, par des moyens de coercition tels que les populations se sont parfois révoltées (Kikuyus au Kenya). La LAE était, à cette époque, devenue un thème technique politiquement dangereux pour les leaders africains. Au Kenya furent imposées les terrasses de diversion ; au Rwanda, ce furent les fossés aveugles d'absorption totale ou les lignes d'herbes. Au Maghreb, les services de DRS ont imposé les banquettes d'absorption totale ou de diversion et la mise en défens des parcours et forêts dégradées. En Afrique et à Madagascar furent interdits les feux de brousse, si nécessaires pour les éleveurs et les pépinières de riz.

### Depuis l'indépendance

Au moment de l'indépendance, deux réactions divergentes ont été observées. Dans

les pays où la LAE fait partie du service des Forêts très structuré comme en Algérie, les projets de DRS ont continué à donner du travail à la population montagnarde, sans changer les méthodes. Ailleurs, la LAE a été simplement abandonnée, en réaction aux méthodes coloniales contraignantes et aux travaux forcés. Mais l'érosion ne s'est évidemment pas arrêtée pour autant !

Depuis les années 1980, de gros problèmes de dégradation de la productivité des sols se sont manifestés en même temps qu'une forte poussée démographique. Dans les pays à main-d'œuvre abondante, on a observé une reprise des travaux de terrassement communautaire (Chine, Rwanda), mais ces efforts n'ont eu que peu d'effets sur la production vivrière.

En 1987, le séminaire de Porto Rico apporte enfin une analyse critique des grands projets de LAE et propose une nouvelle orientation : développer en priorité des conditions favorables au développement des cultures sur les sols productifs et laisser aux États le souci de gérer les sédiments, de stabiliser les ravines et glissements de terrain et de traiter les catastrophes naturelles, qui échappent à la compétence et aux moyens ordinaires des paysans.

En 1983-1999 furent créés des réseaux de chercheurs, enseignants et développeurs, d'abord le réseau Érosion à l'Orstom pour servir de lien scientifique entre les instituts français, puis le réseau GCES avec la FAO, dans la région des Grands Lacs, en 1996 le réseau *Better land husbandry* au Kenya, et enfin les réseaux GRES au Cameroun (1995), GCES au Mali (1999) et au Maroc (2001).

## Les conclusions du colloque de Yaoundé (1999)

Du 9 au 18 décembre 1999, s'est tenu au Cameroun un colloque international sur l'impact des activités humaines sur les phénomènes d'érosion, en particulier en Afrique. Les 82 participants de 19 pays ont présenté 50 communications, 12 posters et 25 documents écrits faisant le point de la situation [60, 61]. Nous en avons tiré sept messages :

1. Les effets néfastes de l'érosion sont importants, mais rarement catastrophiques en Afrique, tant en ce qui concerne le décapage des champs érodés que les nuisances sur le réseau hydrographique.

L'érosion en nappe est mal perçue des paysans, et très dangereuse car elle est dix fois plus dégradante que le décapage (- 30 % de rendement pour 5 cm de décapage) [62]. Malheureusement, les praticiens attendent l'apparition de rigoles et ravines avant d'intervenir. L'expérience

montre qu'il vaut mieux prévoir les risques de dégradation des bonnes terres (GCES) que de concentrer ses efforts sur les terres ravineées (DRS). Or, les ravines et les glissements de terrain, fréquents sur fortes pentes, sont difficiles à maîtriser. On manque de recherches sur les meilleures techniques pour aménager et réhabiliter les ravines et glissements de terrain.

2. Les recherches récentes ont montré qu'il est possible de réduire les risques d'érosion en modifiant les systèmes de production, en soignant la terre et les plantes, mieux qu'en multipliant les structures de drainage des eaux de surface. Mieux vaut disperser les eaux sur la surface rugueuse du champ que concentrer leur énergie dans des canaux susceptibles de déborder en créant des ravines. Pour améliorer l'efficacité des techniques antiérosives, on évolue des banquettes et ados de terre imperméables, vers des « microbarrages perméables » (cordons de pierres, d'herbes ou d'arbustes) et, plus récemment, vers des systèmes de travail réduit du sol sous litière ou sous couverture permanente de légumineuses [63, 64].

3. Les stratégies de lutte antiérosive évoluent de la DRS-CES à dominante mécanique (banquettes, fossés, ados en terre, barrages) vers des démarches plus biologiques (la GCES, souvent sans le savoir) en associant la gestion des eaux (filtration et ralentissement du ruissellement par des micro-barrages filtrants, amélioration de l'infiltration par le paillage et les techniques culturales), la gestion des matières organiques (agroforesterie, gestion des résidus de culture, élevage, légumineuses et fumier) et la gestion des engrais minéraux complémentaires pour assurer le développement optimal des cultures [34, 65].

4. Les recherches ont aussi prouvé qu'il est possible de restaurer la capacité de production des sols dégradés s'ils sont suffisamment profonds. La ressource en sol est donc partiellement renouvelable... Mais cela a un prix : maîtriser le ruissellement, renouveler la macroporosité du sol (travail) et la stabiliser (MO/racines), revivifier l'horizon de surface (fumier/compost), nourrir les cultures (NPK) et remonter le pH à 5 afin que disparaisse la toxicité aluminique. En revanche, restaurer les propriétés primitives des sols tropicaux semble hors de portée économique ; les sols primitifs ne sont d'ailleurs pas toujours très fertiles [66].

5. À l'échelle d'un petit bassin-versant, la dégradation du couvert végétal et des sols, entraîne la réduction du réservoir d'eau dans le sol et de la pluie limite de ruissellement, l'augmentation des débits de pointe et les inondations, la dégradation des berges et du lit des ravins et des rivières, l'augmentation des transports soli-

des et l'ensablement des canaux, réservoirs et ports. A court terme, les effets d'un aménagement antiérosif sur les versants sont inverses : étalement des crues et réduction des transports solides, augmentation de l'infiltration et alimentation des nappes. L'amélioration du rendement des cultures dépend en outre de la satisfaction des besoins en eau et en NPK aux moments où l'exige la physiologie des plantes cultivées (montaison, floraison, épiaison sur céréales).

6. En milieu urbain, peu perméable, le ruissellement est particulièrement abondant. S'il est mal contrôlé, on observe une forte agressivité du ravinement, le sapelement des versants pentus et des berges des rivières, des glissements de terrains, des inondations fréquentes et l'ensablement des bas-fonds [67]. Devant l'extension des zones squattées et des problèmes de drainage, l'État se replie derrière une législation restrictive qui ne résout pas les problèmes : il est conseillé de mettre en place des comités de quartier pour sensibiliser les gens aux risques d'érosion ou d'inondation qu'ils font courir à leurs voisins, et d'organiser la gestion des eaux.

7. Les mesures de ruissellement, d'érosion, de rendements et des états de surface en parcelles d'érosion (> 100 m<sup>2</sup>) continuent heureusement à se pratiquer : sinon comment valider les modèles sans données de terrain ? Les mesures sur ravines, plus rares, sont aussi intéressantes, car elles intègrent l'évolution du ruissellement tout au long du versant. Les mesures de débits liquides et solides à l'échelle des bassins exigent des moyens lourds : elles intègrent le piégeage des sédiments en bas de pente et les remaniements des berges et du lit et ne sont pas directement comparables aux mesures sur versants ni à leur occupation. Pour maîtriser certaines contraintes de temps, on a recours à divers simulateurs de pluies qui aident à paramétrer les bilans hydriques et la stabilité structurale plus que l'érosion. La validité de chaque méthode est limitée par des contraintes et par les effets d'échelle. Les pertes en eau, en sol et en nutriments par érosion en nappe ne sont pas forcément dramatiques : elles dépendent plus des systèmes culturels que des structures anti-érosives conventionnelles. On peut donc tenter de limiter le détachement des particules et l'érosion et maîtriser le ruissellement en améliorant les systèmes de culture. Les transports solides par les instruments de travail du sol, par mouvement de masse ou par le vent sont encore peu étudiés : pourtant, ces processus peuvent mobiliser beaucoup de terre et de nutriments. Pour évaluer la variabilité spatiale de l'érosion, on fait souvent appel à des systèmes d'information géographique

ques (SIG) et à des indicateurs plus ou moins significatifs mais observables sur photo aérienne ou imagerie satellitaire (typologie des traces d'érosion, Césium 137, surface couverte, surface fermée, divers types de croûtes, compacité, pente, érodibilité des sols, etc.) : il faut craindre l'application systématique de ces méthodes spectaculaires sans prise en compte des processus d'érosion les plus efficaces sur le terrain.

## Conclusions générales

### Effets néfastes de l'érosion

Ces effets néfastes sont importants tant dans l'accélération de la dégradation des champs cultivés que dans les villes en forte croissance et, à l'aval, dans les rivières, l'envasement des barrages et des ports. Or, bien peu d'aménagements antiérosifs donnent satisfaction, car les aménagistes attendent l'apparition des ravines pour imposer des structures antiérosives coûteuses. Cependant, l'érosion en nappe, à l'origine de la dégradation des terres, commence dès le défrichement et se traite par l'adaptation des systèmes de production.

### Accélération des connaissances sur les processus et facteurs de l'érosion

Les Chinois ont inventé les terrasses en gradins il y a 4 000 ans. Il a fallu 3 000 ans pour que les caravanes de la soie et des esclaves dispersent ces techniques sur le bassin méditerranéen et l'Afrique. Les techniques de LAE se sont développées empiriquement depuis fort longtemps, bien avant que ne commencent les premières recherches scientifiques (1890, premières parcelles d'érosion en Allemagne).

La recherche sur la LAE est récente. En 1939, Bennett inventait aux États-Unis les terrasses de diversion et développait un réseau de parcelles expérimentales qui ont abouti au bout de 30 ans au modèle empirique de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith (1960-1978). Malgré diverses tentatives de modélisation, on n'a pas encore réussi à trouver un modèle physique applicable par les agronomes dans la majorité des pays dégradés par l'érosion. Dès les années 1960, Hudson [27] a démontré dans les champs africains que l'intensification de la culture pouvait réduire les risques d'érosion en augmentant la couverture végétale. L'application de ce principe a donné lieu au développement d'une nouvelle stratégie (*Land Husbandry* ou GCES) au séminaire de Porto Rico en 1987.

En 1970, Heusch [39] a découvert dans les marnes du Rif marocain que la situation topographique pouvait être plus importante que l'inclinaison de la pente. En 1973, Roose a étendu cette observation aux sols ferrallitiques d'Afrique occidentale [8]. Il a montré que le ruissellement était souvent plus fort sur les pentes faibles (très encroûtées) que sur les versants plus pentus et que les microbarrages perméables étaient plus efficaces que les fossés de diversion [30].

Actuellement, on réduit les structures anti-érosives à des lignes de défense pour orienter les travaux, et on cherche à mettre au point des systèmes de production intensifs où le travail du sol est réduit au minimum sous couvert d'une litière de résidus de culture ou d'une couverture permanente d'herbes (ou mieux de légumineuses), maîtrisée par les herbicides [63, 64, 41].

### Restauration de la capacité de production des sols dégradés

Autre bonne nouvelle : il existe en Afrique des techniques permettant de restaurer en quelques années la capacité de production des sols dégradés suffisamment profonds. La ressource en sol est donc partiellement renouvelable, mais cela a un coût : du travail, du fumier et des engrais complémentaires. La capacité de nourrir des populations est donc étroitement dépendante des conditions économiques de la société. La société occidentale préfère-t-elle développer la production vivrière de ces régions, ou vendre ses propres excédents ?

### Importance de la formation

L'enseignement sur l'érosion et la lutte anti-érosive était, il y a dix ans, tout à fait rudimentaire, tant dans les facultés d'Agriculture, que dans l'enseignement secondaire. Maintenant que le thème de la protection de l'environnement est en vogue, il serait souhaitable de souligner que bien des pollutions des eaux tirent leur origine du développement des divers processus d'érosion. La sensibilisation des enfants devrait se faire dès le secondaire et la formation aux nouvelles méthodes de lutte dans les écoles techniques, les instituts agronomiques et les DEA.

### Évolution de la recherche

Il reste encore à mener bien des travaux pour mieux comprendre la diversité des processus en cause dans le développement des divers types d'érosion et en particulier le ravinement, l'érosion par les outils de travail du sol, les mouvements de masse en montagne, la naissance du ruissellement sur pentes fortes où les croûtes de

battance sont mineures, et l'érosion éolienne. Vu l'étendue des travaux et l'urgence de trouver des solutions pratiques, la recherche devrait se rapprocher des projets de développement, analyser l'expérience paysanne, définir les indicateurs pertinents des causes et des facteurs locaux les plus importants afin de réduire rapidement les risques de dégradation de l'environnement, tout en intensifiant la productivité.

Le défi du XXI<sup>e</sup> siècle est de doubler la production vivrière tous les 20 ans, tout en réduisant les risques de dégradation de l'environnement.

## Références

1. Erhart H. Biostasie et rhexistasie. Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique. *CR Acad Sci Paris* 1955 ; 241 p.
2. Vogt H, Vogt Th. *Érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*. C. Rendu Colloque Labo géographie physique, 1979, université de Strasbourg, 275 p.
3. Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD). *World map of human induced soil degradation : An exploratory map*. Wageningen (Pays-Bas) : ISRIC, 1990.
4. Fotsing JM. Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en pays Bamiléké, Cameroun. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 26 : 241-54.
5. Boissau S, Locatelli B, Weber J. Population and environment relationship. A U-shaped curve hypothesis. *Jardin planétaire* (Chambéry) mars 1999 ; 4 p.
6. Tiffen M, Mortimore M, Gichuki F. *More people, less erosion : Environmental recovery in Kenya*. Chichester (Great Britain) : John Wiley, 1994 ; 26 p.
7. Roose E, Sabir M, De Nani G. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 523 p.
8. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pédol FAO* (Rome) 1994 ; (70) : 420 p.
9. Lilin Ch. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 139-46.
10. Lowdermilk WC. Conquest of the land through 7000 years. *Agric Information Bull USDA, SCS* 1953 ; (99) : 54 p.
11. Jurion F, Henry J. De l'agriculture itinérante à l'agriculture intensifiée. *INEAC* (Bruxelles) 1967 ; 498 p.
12. Food and Agriculture Organization. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. *FAO Soils Bull* (Rome) 1974 ; 24 p.
13. Levang P. Shifting cultivation for transmigrating projects ? How primitive techniques could help to solve development problems in Central-Kalimantan Transmigration areas ? *Limu Per AGRIC Science* 1984 ; 3 : 275-83.

14. Critchley W, Reij C, Turner S. *Soil and water conservation in sub-saharan Africa. Towards sustainable production by the rural poor*. Report IFAD. Amsterdam : CDCS, Free University, 1992 ; 110 p.
15. Bennett HH. *Elements of soil conservation*. New York : Mac Graw-Hill, 1939 ; 530 p.
16. Ellison WD. Studies of raindrop erosion. *Agric Eng* 1944 ; 25 : 131-81.
17. Wischmeier WH, Smith DD. A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. Proc. 7th International Congress Soil Sci Soc 1960 ; 1 : 418-25.
18. Stallings JH. Continuous plant cover : The key for soil and water conservation. *J Soil & Water Cons* 1953 ; 8 : 63-8.
19. Putod R. La protection des vignes contre l'érosion. *Revue Agron Afrique du Nord* 1992 ; 567-76.
20. Monjouze A. *Rénovation rurale : rôle et dispositif d'infiltration*. Alger : Délégation générale, Dépt des Forêts, Service DRS, 1962 ; 16 p.
21. Gréco J. *La défense des sols contre l'érosion*. Paris : Maison Rustique, 1978 ; 183 p.
22. Lovejoy JB, Napier T. Conserving soil : Sociological insight. *J Soil & Water Cons* 1976 ; 415 : 304-410.
23. Hudson NW. Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bull* (Rome) 1991 ; 64 : 65 p.
24. Heusch B. Cinquante ans de banquette de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 153-62.
25. Moldenhauer WC, Hudson N. *Conservation farming on steep lands*. Ankeny (Iowa) : SWC Soc, 1987 ; 296 p.
26. Shaxson TF, Hudson NW, Sanders D, Roose E, Moldenhauer WC. *Land husbandry : A framework for soil and water conservation*. Ankeny (Iowa) : SWC Soc ; WASWC, 1989 ; 64 p.
27. Hudson NW. *Land husbandry*. London : Batsford, 1992 ; 192 p.
28. Roose E. *GCES dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale. Stratégies nouvelles et classiques*. « Soil, Crop, Water management systems for rainfed Agriculture in semi-arid zone » Proceedings, ICRISAT, Niamey, 1987 : 55-72.
29. Roose E, Ndayizigiye F. Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technol* 1996 ; 11 : 109-19.
30. Roose E. Terrasses de diversion ou microbarraques perméables ? Analyse de deux démarches de conservation de l'eau et des sols chez les petits fermiers de la zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 81-92.
31. Roose E, Masson FX. *Consequences of heavy mechanization and new rotation on runoff and on loessial soil degradation in the North of France*. Comm. 92, International Conference "Preserve the land", Honolulu, Hawaii, SCSA (Ankeny, Iowa), éd, 1983 : 24-33.
32. Smolikowski B. *Gestion de l'eau en milieu cultivé sahélien de montagne (Cap-Vert)*. Thèse doctorat en écologie tropicale, université de Toulouse, n° 2826, 1997, 265 p.
33. Roose E, Dugué P, Rodriguez L. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques* 1992 ; 233 : 49-63.
34. Rishirumuhirwa Th. Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation de la fertilité des sols ferrallitiques du Burundi. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 367-84.
35. Smolikowski B. La GCES, une nouvelle stratégie de LAE en Haïti. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 229-52.
36. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.
37. De Noni G, Viennot M, Asseline J, Trujillo G. *Terres d'altitude, terres de risque. La lutte antiérosive dans les Andes équatoriales*. Paris : Éditions Latitudes 23 ; IRD, 2001 ; 220 p.
38. Arabi M. *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen algérien*. Thèse de doctorat de géographie, université de Grenoble, 1991, 276 p.
39. Roose E, Chebbani R, Bourougaa L. Ravinement en Algérie : typologie, contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 2000 ; 11 : 317-26.
40. Heusch B. L'érosion du pré-Rif. *Annales Recherche Forestière du Maroc* 1970 ; 12 : 1-176.
41. Boli Z, Roose E, Bep Aziem 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 du Nord Cameroun (Mbissiri, 1991-92). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 309-26.
42. Van den Abeele M. *L'érosion, problème africain*. Sciences naturelles, T XI. Bruxelles : INEAC, 1941 ; 35 p.
43. Harroy JP. *Afrique, terre qui meurt*. Bruxelles : Éditions Marcel Hayez, 1944 ; 557 p.
44. El Amani S. *Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie*. Tunis : Centre de recherches du génie rural, 1983 ; 69 p.
45. Reij C, Scoones I, Toulmin C. *Techniques traditionnelles de CES en Afrique*. Paris : CTA ; CDCS ; Karthala, 1997 ; 355 p.
46. Roose E. Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne : définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. In : Le Floch E, Floret C, Pontanier R, Cornet A., eds. *L'aridité*. Didactique. Paris : Éditions Orstom, 1990 : 475-500.
47. Robinson D, McKean S. *Shifting cultivation and alternatives. An annotated bibliography (1972-89)*. Wallingford : CIAT/CAB International, 1991 ; 281 p.
48. Evenari M, Shanan L, Tadmor NH. Runoff farming in the desert. *Agron J* 1968 ; 60 : 29-38.
49. Bonvallet J. Tabias et jessour du sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cah Orstom Sér Pédol* 1986 ; 22 : 163-72.
50. Bourges J, Floret C, Girard G, Pontanier R. *Étude de la citerne Telman (1972-77)*. Tunis : Orstom-DRES, 1979 ; 147 p.
51. Roose E, Kabore V, Guenat Cl. The Zaï practice : A West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 1999, 13, 4 : 343-55.
52. Seignobos Ch. Pratiques antiérosives traditionnelles : élaboration des terrasses sur les Monts Mandara et récupération des terres « hardé » dans le Nord-Cameroun. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 18 : 300-5.
53. Diallo A. *La haie dans la préfecture de Faranah (Guinée)*. Monthéry : AFVP, 1994 ; 20 p. + 12 fiches biologiques.
54. Pontanier R. *Synthèse bibliographique sur la maîtrise et l'utilisation des eaux de ruissellement, CES en zones arides*. Tunis : Orstom, 1988, 33 p. multigr.
55. Rochette R. *Le Sahel en lutte contre la désertification*. Weikersheim (Allemagne) : CILLS/PACC/GTZ, 1989 ; 592 p.
56. Laouina A, Ait Hamza M, Chaker M, El Abassi H. *Techniques traditionnelles de CES*. Rapport CDCS, Free University, Amsterdam, 1995, 112 p.
57. Baumer M. *Agroforesterie et désertification*. Wageningen (Pays-Bas) : ICRAF-CTA, 1987 ; 260 p.
58. Gosselin M. *L'hydraulique en Tunisie*. Tunis : Archives Institut Pasteur, 1939 ; tome 3, 148 p.
59. Reij C, Mulder P, Begemann L. *Water harvesting for plant production*. World Bank paper n° 91. Washington : World Bank, 1988, 123 p.
60. Roose E, Lamachère JM. Influence de l'homme sur l'érosion : vol. 1 : À l'échelle du versant. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 608 p.
61. Roose E, Lamachère JM. Influence de l'homme sur l'érosion. Vol 2 : Bassins-versants, élevage, milieu urbain et rural. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 578 p.
62. Roose E, Barthès B. Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2001 ; 61 : 159-70.
63. Lal R. No-till farming. *Soil and water conservation and management in the humid tropics*. Monograph 2. Ibadan : International Institute of Tropical Agriculture (IITA), 1983 ; 64 p.
64. Seguy L, Bouzinac S, Pacheco R, Kluthcouski J. *Des modes de gestion mécanisée des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol, appliquée aux Cerrados du Centre-Ouest brésilien*. Montpellier : IRAT, 1989 ; 185 p.
65. Zougmore R, Zida Z, Kambou F. Rôle des aménagements dans le succès des demi-lunes et du Zaï. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 536-50.
66. Roose E, Kabore V, Guenat C. Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 159-74.
67. Tchotsua M, Bonvallet J. Érosion urbaine au Cameroun : processus, causes et lutte. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 324-31.