

ORSTOM

A C T U A L I T É S

**SPÉCIAL
ÉROSION**

N° 56

1998

L'INSTITUT
FRANÇAIS
DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
POUR LE
DÉVELOPPEMENT
EN COOPÉRATION

LE LABORATOIRE D'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES SOLS CULTIVÉS

Basé au Centre Orstom de Montpellier, le laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés, LCSC, allie les travaux de terrain (région, unité de paysage, parcelle, serre), à ceux d'un laboratoire de recherche et d'analyses physiques et chimiques, sur la thématique de la dégradation des sols cultivés des régions chaudes. L'approche est donc multi-scalaire et inclut des aspects de spatialisation. Le LCSC est inscrit dans l'UR4 "Dynamique et Usages des milieux terrestres tropicaux des régions chaudes" et participe aux opérations de recherche des programmes "savanes", "sezam" et "forêts". Dans ce cadre institutionnel, le LCSC apporte, à l'échelle fine du laboratoire et en complément des résultats de terrain, des connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement des sols des régions tropicales et méditerranéennes, notamment les modifications introduites par l'homme (pratiques agricoles, terres de parcours, jachère...) et les moyens de mieux gérer celles-ci pour éviter la dégradation du sol.

Le LCSC est équipé et structuré pour répondre à ce questionnement, notamment sur les aspects suivants : i) étude de la caractérisation et de la dynamique de stockage de la matière organique, ii) méthode globale d'évaluation (tests de laboratoire et de terrain) de la susceptibilité des sols au ruissellement et à l'érosion, iii) étude du fonctionnement du système d'échange ionique et ses influences sur la disponibilité des nutriments et sur la stabilité des agrégats. Il existe au LCSC trois réseaux d'animation scientifique : un réseau érosion reconnu au niveau international (le bulletin annuel de ce réseau est référencé par Cab International et Current Contents), co-animé par E. Roose et G. De Noni du LCSC et J.M. Lamachère du laboratoire d'hydrologie, et 2 réseaux plus récents en cours de développement, "Structure et fertilité des sols" (R. Moreau et Chott en poste au Sénégal) et "Solution du sol et alimentation hydrique de la plante" (R. Moreau et B. Jaillard de l'Inra). Signalons enfin que le LCSC a été choisi comme équipe d'accueil de doctorants du DEA national de pédologie et que plusieurs membres de l'équipe donnent des cours dans l'enseignement supérieur. Par son activité de recherche, de formation et d'enseignement, le LCSC participe fortement à l'action de l'Institut dans le domaine de la dégradation et de la gestion durable des sols.

Georges De Noni

Contact : Eric Roose, Georges De Noni, J.M. Lamachère : Orstom, BP 5045 Montpellier, F 34032.France.
Tel : (33) (0)467.41.62.65 ou 61. Fax : (33)(0)467.41.62.94.
Email : lamacher ou roose ou denoni @mpl.orstom.fr

RÉSEAU ÉROSION FRANCOPHONE

Pourquoi faire ?

- associer des équipes de recherche, de formation et de développement intéressées par les multiples facettes de l'érosion en milieu humanisé
 - accélérer la diffusion de l'information,
 - aider les jeunes à publier leurs résultats,
 - orienter les recherches vers certains domaines prioritaires tant dans les pays d'agriculture intensive que dans les régions en voie de développement.
- Par exemple : le coût de l'érosion, l'efficacité et le coût de la lutte antiérosive, la restauration de la capacité de production des sols dégradés, l'amélioration de la capacité d'infiltration des terres, la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et des nutriments, etc

Activités :

- la réunion annuelle rassemble une centaine de participants de 10 à 20 pays autour d'un thème traité en salle et au cours d'une visite de terrain,
- le bulletin du Réseau Erosion, un volume de 400 à 600 pages est diffusé à 700 exemplaires dans 52 pays. Il fournit un document de travail comportant les nouvelles du réseau, le compte rendu des " Journées Erosion ", une quarantaine de communications, une liste bibliographique des documents reçus ou consultés, des résumés de thèses, et des nouvelles telles que les publications récentes, les congrès et les adresses des participants.
- une bibliothèque rassemble les documents qui nous sont envoyés sur le thème de la lutte antiérosive.

Organisation :

Elle se veut souple et efficace : elle comprend,
- un Comité d'animation multidisciplinaire ;
- un cercle de dix conseillers représentant les organismes français les plus concernés ;
- un cercle de dix correspondants nationaux.

Participation :

Environ 600 participants provenant de 52 pays : 270 Européens, 250 Africains, 70 Américains et dix Asiatiques.

45% sont des chercheurs, 20% des formateurs et 35% des développeurs.

Jusqu'ici, nous avons été financés par l'Orstom, la Coopération française, le CTA et l'OSS que nous remercions vivement.

Pour s'inscrire nous demandons une lettre d'inscription et une participation annuelle aux frais (100 FF pour les privés, 200 FF pour les organisations, 50 FF pour les privés des PVD) donnant droit au bulletin du Réseau Erosion.



Mascara en Algérie. Ravinement d'un paysage marneux.
Photo : Eric Roose

2

Introduction

2

10

Processus d'érosion

10

- Erosion éolienne au Niger 10
- Erosion éolienne et apports géochimiques au sol par les poussières atmosphériques en Afrique de l'Ouest et Centrale 11
- Ravinement des terres noires de Haute Provence 13
- Bilans d'érosion à l'échelle sous-continentale : les exportations de matière sur le bassin du fleuve Congo-Zaïre 14
- Transferts et dépôts de matière dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali 15
- Encroûtement superficiel au Sahel 16
- Modélisation du ruissellement et de l'érosion sur les champs cultivés : 18
- Remplissage et ensablement des petites retenues au Nord-Mexique 19
- Les lacs collinaires, infrastructures pour maîtriser le ruissellement et l'érosion 20
- Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages 21
- La maîtrise de l'érosion et du ruissellement dans le Nordeste sec du Brésil 22

23

Nouvelles stratégies de lutte antiérosive 23

- Etude de l'érosion et de la conservation des sols cultivés dans les Andes d'Equateur 23
- Efficacité du paillage léger et des haies vives pour lutter contre le ruissellement et l'érosion sur les versants raides cultivés au Cap-Vert 24
- Les techniques d'aménagement des terres sahéliennes : que penser des cordons pierreux et du labour ? 25
- Les montagnes méditerranéennes d'Algérie 26
- Influences du système de culture sur les risques érosifs et la production intensive du coton et maïs en savane humide du Nord-Cameroun 27
- La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols au Rwanda 29
- Influence du travail du sol et des apports sur le ruissellement et l'érosion : le cas des Rougiers de Camarès, Sud-Aveyron 31
- Culture bananière et techniques de gestion des sols acides du Burundi 32
- Droits fonciers et érosion en Afrique semi-aride 33
- Semis direct et contrôle de l'érosion dans les "cerrados" du Brésil 34

35

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B* 15610 Ex : 1

Restauration de la productivité des sols tropicaux 35

- A propos des pratiques antiérosives traditionnelles au Cameroun 35
- Le zaï, un système traditionnel complexe de réhabilitation des terres dégradées en Afrique soudano-sahélienne 38
- Restauration de terres agricoles à partir de cendres volcaniques au Salvador 39
- Les sols volcaniques indurés d'Amérique latine 40
- L'habilitation agricole des tufs volcaniques indurés ou "tepetates" dans l'altiplano mexicain 41

Directeur de la publication :
Guy Jacques
Rédactrice en chef :
Catherine Fontaine-Perrois
Orstom : 213, rue La Fayette
75010 Paris
Tél : 01 48 03 77 77
Fax DISC : 01 40 34 69 13
email :
fontaine@paris.orstom.fr
web : http://www.orstom.fr
ISSN 0758 833 X
Commission paritaire
N° 1864 ADEP
Imprimerie : Québecor

L'érosion : 40 ans de recherches multidisciplinaires

L'érosion est un processus complexe : il concerne l'arrachement, le transfert et la sédimentation de particules par l'eau, le vent ou la gravité. Depuis l'origine de la terre, l'érosion façonne les reliefs et construit les plaines, lesquelles nourrissent la majorité des populations du monde.

En agglomérant des peuples autour des villes, chaque civilisation a créé les conditions favorables au ruissellement, à la dégradation des sols et à l'accélération de l'érosion : ce phénomène s'est encore accentué aujourd'hui (voir les inondations de Nîmes en 1987 ou les écoulements boueux de Sarno en 1998). Face aux risques liés à l'érosion, les anciennes sociétés rurales ont élaboré empiriquement des stratégies permettant de conserver les sols et de maintenir la productivité des terres. Mais lorsque la population et ses besoins évoluent trop vite, se développe une crise à la fois socio-économique et érosive à laquelle la société tente de répondre soit par l'émigration d'une partie de la population, soit par la mise au point de nouvelles techniques d'aménagement plus intensives et plus durables. Lutter contre l'érosion est donc une activité humaine fort ancienne, remise à l'ordre du jour par l'urbanisation incontrôlée et par la mise en culture de terres particulièrement sensibles à ce phénomène.

L'ambition de ce numéro spécial sur l'érosion est de rassembler le témoignage des nombreux chercheurs de l'Orstom, agronomes, pédologues, géographes et hydrologues qui ont consacré une large part de leurs travaux aux diverses facettes des problèmes d'érosion, dans des conditions écologiques et humaines très variées. Ils ont étudié les causes et les facteurs conditionnant l'importance de l'érosion, à diverses échelles (de l'agrégal à la parcelle et des versants jusqu'aux grands fleuves), sous pluies naturelles ou simulées. Ils ont aussi évalué les méthodes traditionnelles et modernes de lutte antiérosive et, plus récemment, proposé une nouvelle approche de la gestion des eaux de surface, de la biomasse et de la fertilité des sols permettant de restaurer, en quelques années, la capacité de production des terres dégradées.

LES PREMIERS TRAVAUX EN AFRIQUE ET À MADAGASCAR.

Depuis 7 000 ans, l'homme accumule les traces de ses luttes pour maîtriser les diverses formes de l'érosion et améliorer la gestion de l'eau et de la fertilité des sols (Lowdermilk, 1953). Mais les recherches sur l'origine et les facteurs de l'érosion en parcelles expérimentales n'ont commencé qu'en 1890 en Allemagne, dans les

années 1935 aux USA et 1954 en Afrique francophone.

C'est à l'occasion de plusieurs missions aux États-Unis vers les années 1950 que Georges Aubert, Frédéric Fournier et Roger Fauck découvrirent l'importance des recherches américaines sur la conservation de l'eau et des sols. Aussitôt Fournier (1960) et Fauck (1954), s'appuyant sur les stations agronomiques de l'ORS-TOM et des futurs instituts du CIRAD, installèrent un premier réseau de parcelles de mesure du ruissellement et de l'érosion en Afrique occidentale et à Madagascar. Parallèlement, les hydrologues de l'ORS-TOM ont étudié les débits liquides (Rodier, 1964) et, plus tard, les transports solides (Colombani, 1967; Billon, 1968; Carré, 1972; Nouvelot, 1972) des grands fleuves et de quelques petits bassins expérimentaux (Vuillaume, 1969; Mathieu, 1972; Molinier, 1976). Ils se sont intéressés également à l'envasement des retenues de barrages en Tunisie (Claude et Chartier, 1977) et, avec la collaboration d'autres disciplines, aux dépôts alluvionnaires de l'oued Medjerda (Claude et al., 1977). Des géographes comme Rougerie en Côte d'Ivoire (1958, 1960), Bonvallot en Tunisie (1984), Avenard au Maroc (1989) ont quantifié les processus, évalué les facteurs et les méthodes de lutte et cartographié les risques des divers processus d'érosion.

À la faveur de ces premiers travaux, les chercheurs découvrent que la mise en valeur des sols tropicaux est difficile, car aussitôt la végétation luxuriante défrichée et rangée sur des andains, les matières organiques minéralisent, les sols se dégradent rapidement, l'érosion augmente très fortement, et la production des cultures décline en 2 à 5 ans (Fauck, 1954, 1956). Les sols forestiers, initialement les plus fertiles sont aussi très fragiles, car l'essentiel de leur fertilité se trouve concentré dans la litière et l'humus des 20 premiers centimètres. En réalité, la luxuriance de la végétation est un leurre, car elle vit de sa décomposition et les sols tropicaux ferrallitiques, une fois dépouillés de l'humus ne stockent que peu d'eau et de nutriments. Dès qu'on libère le sol de la végétation et que le sol nu est soumis à l'énergie de battance des gouttes de pluie, la surface se ferme, s'encroûte et le ruissellement s'accélère ainsi que l'érosion en nappe : celle-ci érode sélectivement les particules fines (matières organiques, argiles, limons et nutriments adsorbés) qui constituent l'essentiel de la fertilité d'un sol (Roose, 1977). Fournier (1960) montre que les transports en suspension dans les grands fleuves dépendent de la répartition des pluies, de la pente du bassin et de la végétation : il en tire la carte des risques d'érosion en Afrique. Fauck (1954), montre que l'érosion augmente avec la pente, mais



En Algérie, près de Medea
au sud d'Alger.
Influence du défrichement,
de la culture et du pâturage
sur un sol marneux :
naissance de l'érosion en
nappe et rigoles.

démarre sur des pentes très faibles (1% en Casamance). Dabin et Leneuf (1958) étudient l'impact des plantes de couverture et prouvent qu'on peut maîtriser l'érosion en nappe avec un simple paillage de 1cm d'épaisseur. Quantin et Combeau (1962), Morel et Quantin (1972) montrent en Centre Afrique que la fragilité des agrégats et l'érosion dépendent de l'abondance et du type d'humus du sol. Celui-ci diminue rapidement durant la culture et augmente progressivement durant les 3 à 10 ans de jachère qui succèdent aux cultures.

La synthèse de ces premiers travaux régionaux a été réalisée par Fournier (1967), Fauck et al. (1969), Quantin et Combeau (1962), Charreau (1969-1972), Roose (1967, 1977), et le CTFT (Goujon P., Bailly C, de Vergnette J., Benoit de Coignac G., Roche P., en 1968).

MODÉLISATION DE L'ÉROSION EN NAPPE SUR PARCELLES

Pour pousser plus loin l'analyse systématique des causes et des facteurs de l'érosion dans les champs cultivés, il a été nécessaire de mettre en place un réseau de parcelles expérimentales, de standardiser les protocoles et d'introduire les parcelles nues, témoins universels permettant de rattacher les expérimentations au modèle américain "USLE" (Wischmeier et Smith, 1960). C'est un modèle empirique liant les pertes en terre au bas d'une parcelle cultivée standard au produit d'un indice d'érosivité des pluies par quatre facteurs de résistance du milieu : l'érodibilité d'un sol nu, la topographie, le couvert végétal et enfin les pratiques culturales antiérosives.

L'érosivité des pluies a été dépouillée sur 10 ans pour 20 postes enregistrant les intensités. Des cartes de l'érosivité des pluies ont été dressées pour l'Afrique occidentale et centrale (Roose 1973, 1977). Cette étude a montré que les pluies tropicales peuvent être, en moyenne, 20 à 100 fois plus agressives que celles des régions tempérées, 2 fois plus érosives qu'en montagne tropicale et 5 fois plus agressives qu'en montagne méditerranéenne.

L'érodibilité des sols dépend de leur mode de formation (pédogenèse), mais surtout de leur texture (lithologie), des matières organiques et de la stabilité de leur structure, ces deux dernières évoluant avec le mode d'exploitation. Ainsi, la sensibilité des sols à l'érosion peut changer au fil des années. (Quantin, Combeau, 1962 ; Roose, 1973, 1980, 1992). Ce thème des liens entre les matières organiques du sol, son agrégation et son érodibilité est au centre des préoccupations du Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC Montpellier) à la recherche d'indicateurs de la dégradation des sols et des risques potentiels d'érosion et ruissellement (Barthès, Albrecht, Asseline, De Noni, Roose, Viennot, 1997).

L'influence de la pente est complexe. Dans plusieurs cas, on a observé une réduction du volume ruisselé lorsque la pente augmente (Roose 1973, 1993), mais, le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente car se développe une érosion en rigole dix fois plus agres-

sive que l'érosion en nappe. Dans certains cas la position topographique est prépondérante: l'érosion se manifeste alors sur les glacis ou terrasses de bas de pente et remonte vers le sommet des versants plus inclinés (Roose, 1994; De Noni, Viennot et al. 1997). Quant à la longueur de pente sur laquelle les manuels ont basé la lutte antiérosive classique (terrasses), il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions entre la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

Le couvert végétal et les systèmes de culture sont sans aucun doute les facteurs les plus puissants pour réduire les risques d'érosion (Roose, 1973-77-80-94 ; Fritsch, 1992). Point n'est besoin de garder une haute forêt dense pour protéger le sol : la litière et la végétation basse sont tout aussi efficaces que la canopée dressée pour absorber l'énergie des pluies et du ruissellement (Roose, 1973-94 ; Valentin, 1981). Alors que le travail du sol (Lamachère, 1991) améliore temporairement l'infiltration, il expose le sol nu à l'agressivité des pluies, réduit sa cohésion, enfouit les matières organiques et favorise leur minéralisation en aérant l'horizon humifère. Le semis direct sous litière est une tentative de se rapprocher du milieu naturel où le sol reste couvert et protégé de l'agressivité des pluies. Comme dans le milieu naturel, il n'est aéré que par la mésofaune. Les nutriments sont prélevés par les racines profondes des arbres et concentrés en surface par les apports de litière (Leprun, 1985; Blancaneaux et al. 1994; Boli et al. 1994). La matière organique intervient à plusieurs niveaux pour réduire les risques d'érosion. A court terme, celle-ci enfouie ne réduit nettement ni le ruissellement, ni l'érosion (Boli et al. 1994; Roose, Assogba, Guillermin, 1997; Barthès et al. 1997). Mieux vaut la maintenir à la surface du sol, gérer les adventices et favoriser les activités de la mésofaune, de manière à protéger efficacement la surface du sol contre l'énergie des pluies et du ruissellement (Roose, 1994).

Diverses techniques antiérosives ont été testées en parcelles sur versants : elles ont pour effets de freiner les eaux de ruissellement à travers une bande enherbée (Roose et Bertrand, 1971; Boli et al. 1996; De Noni et Viennot 1993), une haie vive (Ndayizigiye, 1993 ; Roose, 1993; Smolikowski et al., 1997 ; Boli et al. 1996) ou un cordon pierreux (Lamachère et Serpantié, 1991 ; Serpantié et Lamachère, 1992). Il apparaît que la diversion des eaux excédentaires dans divers canaux est moins efficace que la dissipation de l'énergie à travers un microbarrage perméable qui filtre et ralentit l'eau, mais ne l'accumule pas derrière une digue imperméable (Roose, 1986; De Noni, Viennot et al., 1997).

LA SIMULATION DE PLUIES ET LA DYNAMIQUE DU RUISSÈLEMENT.

Parce que les pluies érosives sont variables dans le temps et dans l'espace, des chercheurs américains (Meyer, 1960 ; Swanson, 1965) ont développé des



Sabouna au Burkina Faso.
La dégradation de la végétation et du sol brun rouge entraîne une augmentation du ruissellement et le ravinement.

simulateurs de pluies, dispositifs mobiles capables de produire à volonté des pluies d'intensité, de hauteur et d'énergie semblables à celles des pluies naturelles. Il est alors devenu possible de raccourcir les temps d'observation de terrain et de simuler des averses de fréquence rare, celles qui causent le plus de dégâts. La méthode a été introduite en Afrique par Hudson en Rhodésie (1960), puis par une équipe de pédologues et hydrologues de l'ORSTOM à deux échelles :

- le modèle Swanson, adapté par Asseline, Roose et Collinet, simule 4 intensités de pluie (45-60-90-120 mm/h.) sur 200 m² et permet d'étudier l'érosion en nappe et rigoles sur différents sols et systèmes de production. Il a effectué 13 missions entre la forêt subéquatoriale de Côte d'Ivoire (Roose et Asseline 1978 ; Lafforgue et Naah, 1976) et les savanes soudano-sahéliennes du Burkina Faso et du Niger (Asseline 1997, Lafforgue et Naah, 1976; Collinet 1988).

- Le minisimulateur, type Orstom, mis au point par Asseline et Valentin (1978), n'arrose que quelques m², le dispositif d'arrosage étant monté sur un derrick de 4 m de haut. Ce modèle, beaucoup plus mobile et moins coûteux, a permis d'étudier la variabilité du ruissellement et de l'infiltration en fonction de l'intensité des pluies, des sols, de leurs états de surface et de leur humidité préalable. En Afrique de l'Ouest, il a permis également d'évaluer l'effet de la battance des pluies sur le volume et la charge solide déplacée à l'échelle du mètre carré. Il a d'abord été utilisé au Sahel pour modéliser le ruissellement des petits bassins versants en association avec une cartographie des états de surface et l'observation des écoulements au cours d'une saison de mesures des pluies et des débits sur bassins versants (Casenave, 1982; Chevallier et Valentin, 1984; Thébé, 1987; Albergel, 1987 ; Bricquet et al., 1987; Casenave et Valentin, 1989; Lamachère et Puech, 1996).

En France, le minisimulateur Orstom a servi à estimer la dégradation de l'infiltration sous l'effet de la battance des pluies sur des sols à texture très diverse, soumis à des techniques culturales variées. (5 thèses à l'université d'Orléans avec la coopération de l'Inra et de plusieurs Chambres d'Agriculture). Il en est conclu que ces sols se dégradent par deux voies différentes, par encroûtement des sols limono-argileux ou par tassement des sols sableux. Quel que soit le type génétique du sol, dès qu'il est labouré et exposé à la battance des pluies, la charge solide du ruissellement augmente significativement. La gestion des résidus de récolte à la surface du sol est donc une des techniques les plus efficaces pour réduire les risques de ruissellement et d'érosion (Lelong, Roose, Darthout, Trevisan, 1995). Avec la Chambre d'Agriculture de l'Aveyron, l'équipe du LCSC a testé l'érodabilité du sol en fonction de diverses techniques culturales et apports organiques et minéraux (Barthès et al., 1997).

La méthode de simulation de pluie a aussi été diffusée en Amérique latine (Brésil, Equateur, Costa Rica, Mexique, Nicaragua) pour définir les propriétés des sols liées à la dynamique de l'eau, à la naissance du

ruissellement et de l'érosion (Audry, Asseline, De Noni, Collinet, Molinier, Prat, Viennot, Leprun). En Equateur, la simulation de pluies a montré la forte érodabilité des andosols dès lors qu'ils sont cultivés et les risques de ruissellement des cangahua, andosols indu-rés décapés (De Noni, Viennot, Asseline et al., 1997).

LES AUTRES PROCESSUS ET LES BILANS DE MATIERES SUR BASSINS VERSANTS

Les phénomènes d'érosion comportent une série de processus complexes aboutissant à l'arrachement de matières par des énergies diverses (gouttes de pluie, ruissellement, vent) ou plus simplement sous l'effet de la gravité. Le transport et le dépôt des sédiments, avec ou sans triage des particules, font également partie des processus associés à l'érosion.

A l'Orstom, deux programmes de recherche seulement concernent les transports solides par le vent : les apports de limons en suspension dans les nuages (Orange au Sénégal, RCA et Mali) et la saltation des sables au Niger (Rajot). Rares sont également les programmes de recherche qui ont étudié l'érosion linéaire (Olivry et Hoorelbeck, 1989) et surtout les glissements de terrain (Bonvallot, 1984 ; Avenard, 1989). Mais de très nombreux programmes de recherche ont étudié l'érosion en nappe, les causes et les facteurs qui en modifient l'expression.

Les processus érosifs et les bilans de matières transportées évoluent en fonction de l'échelle d'observation. Les pédologues se sont penchés d'avantage sur la stabilité des agrégats et des mottes, sur l'érosion à l'échelle des champs (superficies de 1 à 1 000 m²). D'autre part, les hydrologues ont abordé le problème du ruissellement et de l'érosion à une échelle plus globale, à l'exutoire d'un canal drainant l'ensemble d'un bassin versant sur des superficies variant de 1 à 100 000 km² (Vuillaume, 1969 ; Molinier, 1976 ; Servat, 1984 ; Fritsch, 1992 ; Nouvelot, 1993 ; Olivry et Boulègue, 1995). Les problèmes d'échelle entre pédologues et hydrologues sont donc difficiles à résoudre et les études entreprises ensemble avec les simulateurs de pluies ont permis de mieux apprécier ces différences des objets de nos études (Collinet 1988 ; Casenave et Valentin 1989). D'importants efforts restent à accomplir pour comprendre et appréhender les processus associés au ruissellement à l'échelle du versant (Planchon, 1991 ; Peugeot 1995) et plus particulièrement les processus érosifs (Smolikowski et al., 1997). Une intéressante étude débute au Mali pour tenter de relier la charge solide des petits affluents du fleuve Niger au ruissellement et à la charge solide des parcelles situées tout au long de la toposéquence et des ravines qui intègrent progressivement les eaux chargées du sommet des collines jusqu'à la plaine alluviale (Thèse Diallo). Elle tente d'adapter au Mali les itinéraires techniques étudiés au Cameroun pour la production intensive et durable du coton et du maïs, deux cultures essentielles dans la zone soudano-sahélienne (Boli et al., 1996).



Près de Medea en Algérie. Ravinement et érosion en masse dans une marne gypseuse.

A l'échelle des grands bassins fluviaux, un ouvrage récent associant hydrologues et géochimistes (Olivry et Boulègue 1995) fait le point des connaissances sur le fonctionnement des grands hydrosystèmes intertropicaux :

- Bandama, Côte d'Ivoire (Mathieu, 1972 ; Monnet, 1971)
- Congo (Olivry, Bricquet et al. 1988 ; Orange, Olivry et Censier 1995),
- Niger (Olivry, Gourcy et Touré 1995),
- Amazone (Guyot, 1992 ; Guyot, Bourges et Cortez, 1994).

Des travaux importants, associant hydrologie et géochimie, ont été aussi réalisés sur le lac Tchad (Gac, 1980 ; Olivry, Chouret et al., 1997) et sur la Medjerda en Tunisie (Rodier et al., 1981).

Pour le fleuve Congo, le flux moyen spécifique en matières solides et dissoutes est de 26,3 t/km²/an, 20 t/km²/an pour le Niger supérieur, 293 t/km²/an pour le Rio Madeira, principal affluent andin de l'Amazone. Sur le Congo à Brazaville, l'érosion mécanique (suspensions = 88 kg/ha/an) constitue 33% du flux de matières contre 67 % pour l'érosion chimique (éléments dissous). Sur le Rio Madeira à Villabellla l'érosion mécanique correspond à 85% du flux total de matières.

A pluviométrie annuelle équivalente, 1 km² du Rio Madeira produit ainsi 2 fois plus d'eau, 4 fois plus de matières dissoutes et 30 fois plus de matières particulaires que 1 km² du bassin du Congo.

EVOLUTION DES STRATÉGIES DE LUTTE ANTIÉROSIVE.

Des stratégies traditionnelles dont l'efficacité est liée au contexte social et économique

Pour faire face aux problèmes de dégradation des sols, les sociétés rurales ont développé des stratégies de gestion de l'eau et de la fertilité des sols dont l'efficacité est liée au milieu physique et plus encore aux conditions socio-économiques locales. Par exemple, la culture sur brûlis, connue sur les 4 continents, est une méthode non destructrice des sols tant que la population ne dépasse pas 10 à 40 habitants par km² en économie de subsistance. Il faut en effet 10 à 50 ans de jachère pour reconstituer la fertilité d'un sol cultivé durant 2 à 5 ans après brûlis. Dès que la pression foncière augmente du fait des besoins croissants de la population, la durée de repos du sol diminue et sa fertilité se dégrade. A l'autre extrême se trouvent les terrasses en gradins développées depuis des siècles autour de la Méditerranée, (mais aussi en Afrique, en Asie et en Amérique latine). Elles n'apparaissent que là où manquent les terres planes, où les salaires sont bas et la main-d'œuvre abondante. Comme il faut 1 000 à 1 500 jours de travail pour aménager un hectare, les terrasses ne se développent que là où il y a une forte pression démographique, militaire ou religieuse, et où la rentabilité des cultures est élevée (irrigation fréquente).

En Tunisie, Bonvallet (1986) a étudié le système

traditionnel des "jessours", digues de terre qui permettent de construire de minuscules jardins multiétagers en collectant au fond des vallons arides les eaux de ruissellement des versants et leur charge en limons. Au Nord-Cameroun, Seignobos a montré comment les Mafa sur les Monts Mandara, créent des sols cultivables en accélérant l'altération des éboulis de granite (jus de fumier, feux sous roche, semis de graines d'arbustes dans les fissures et aménagement des fourmilières) et la formation de minuscules terrassettes (construction de murettes de pierres reliées par diverses herbes, drainées par des chemins d'eau empierrés). On verra plus loin les techniques complexes du "zaï" développées par les Mossis pour récupérer les glaciés de sols profondément dégradés (Roose et al. 1992). Enfin, Lamachère et Serpantié (1991) ont testé l'efficacité des cordons de pierres et du travail du sol en zone sahélienne du NO du Burkina.

Ces nombreuses techniques traditionnelles, souvent très efficaces, sont actuellement abandonnées car elles n'arrivent plus à répondre aux défis actuels : la population a été multipliée par 5 depuis le début du siècle et double tous les 25 ans, les besoins monétaires ont beaucoup augmenté et le travail de conservation des sols n'est pas rentable à court terme.

DES STRATÉGIES MODERNES D'ÉQUIPEMENT RURAL HYDRAULIQUE PAS TOUJOURS ADAPTÉES

Devant l'inefficacité des méthodes traditionnelles, le Pouvoir Central a chargé ses services techniques de proposer pour le bien commun, des solutions aux problèmes de dégradation de l'environnement qui cachent aussi des crises sociologiques. Sur le pourtour du bassin méditerranéen et aux États-Unis, d'importantes opérations de protection et de conservation des eaux et des sols ont ainsi vu le jour.

La RTM (restauration des terrains de montagne) a été créée en 1850 par les forestiers pour restaurer, en montagne, les sols dégradés par le surpâturage des terrains communaux. Des travaux exemplaires (reforestation des hautes vallées, correction des lits des torrents) ont été réalisés dans les Alpes et dans les Pyrénées pour protéger les axes de circulation et l'aménagement des vallées (irrigation, villes, industries). Les problèmes des éleveurs pauvres ont été "résolu" par l'émigration vers les villes industrielles et les colonies.

La CES (conservation de l'eau et des sols) est née aux USA lors de la crise économique de 1930. Suite à la mise en valeur agricole des terres fragiles de la grande prairie par les paysans immigrés d'Europe, une érosion éolienne catastrophique s'est développée, provoquant les fameux "dust bowl", nuages de poussière si denses qu'il faisait noir en plein jour. Bennet, le père des "conservationnistes" a créé, dans chaque comté des USA, un service d'agronomes chargé d'aider les paysans volontaires (aides technique et financière) pour conserver la productivité de la terre et la qualité des eaux.



Simulateur de pluie type Swanson sur les parcelles d'érosion d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire.

La DRS (défense et restauration des sols) s'est développée de 1940 à 1980 autour du bassin méditerranéen pour faire face à la dégradation des terres et aux problèmes d'envasement très rapide des barrages. Il s'agit du mariage entre les deux précédentes approches pour reforester les têtes de vallée, corriger les ravines et torrents et aménager des banquettes sur les terres cultivées sur versants pentus.

En 1987 à Porto Rico, eut lieu un séminaire pour analyser les causes de l'échec de ces stratégies, énoncer les conditions de réussite des projets de lutte anti-érosive (LAE) et proposer une nouvelle approche. Aux USA, malgré 50 ans de CES et des milliards de dollars investis, plus de 25% des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an, limite tolérable pour protéger la productivité des terres et la qualité des eaux. En Afrique, les paysans s'opposent aux techniques mécaniques proposées par les technocrates : les terrasses et les diguettes font perdre 8 à 20 % des surfaces cultivables, elles n'arrêtent pas la dégradation de la productivité, réduisent la liberté de circulation et gênent la mécanisation. Mais surtout, les paysans africains craignent que, à travers ces aménagements, l'Etat tente de mettre la main sur les terres gérées traditionnellement par le droit coutumier.

Peu d'études scientifiques ont été conduites sur l'efficacité des méthodes anti-érosives. Au Bénin, Verney, Volkof et Willaine (1967) ont montré que le ruissellement et l'érosion ne changent guère avec la longueur de pente. Il en va de même au Cameroun sur des sols ferrugineux sableux sauf s'il se développe une érosion linéaire (Boli, Roose et al., 1996). En Algérie, l'enquête menée par l'équipe INRF-ORSTOM avec la collaboration des Eaux et Forêts, a fait ressortir que sur 350 000 ha aménagés, plus de 20% ont disparus, plus de 60% sont dégradés car jamais entretenus; quant aux aménagements en bon état, il n'est pas démontré que l'érosion y pose des problèmes majeurs. On peut toujours penser que sans ces aménagements imparfaits, la situation aurait été pire, mais les chercheurs constatent que, malgré 40 années d'investissements lourds pour imposer la DRS, les terres continuent à se dégrader, les barrages à s'envaser rapidement (durée de vie de 30 à 50 ans) et le bois d'œuvre à manquer cruellement.

UNE STRATÉGIE PARTICIPATIVE DE DÉVELOPPEMENT RURAL ET DE GESTION DE TERROIR

Devant l'importance des échecs des grands projets comprenant un volet de lutte anti-érosive, un groupe de chercheurs et de praticiens ont proposé une nouvelle approche tenant compte des leçons des échecs et des réussites du passé. Cette approche est décrite dans une série de livres intitulés "Land husbandry" (Shaxson, Hudson, Sanders, Roose, Moldenhauer, 1987; Hudson 1992), expression traduite par GCES : gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. (Roose, 1994). Le principe est simple. Pour que l'action d'aménagement soit durable, la participation paysanne est indispensable et il faut donc résoudre d'abord les problèmes majeurs liés

à la valorisation de la terre et du travail. Le défi à relever est de doubler la production en 25 ans au rythme de la croissance démographique, tout en réduisant sérieusement les risques de ruissellement et de dégradation des sols par érosion. Ceci ne peut se faire sans restituer le pouvoir d'innovation aux paysans pour modifier et intensifier le système de production, améliorer la couverture végétale et l'infiltration, en résumé gérer au mieux l'eau, la biomasse et les nutriments disponibles.

Cette nouvelle démarche entraîne un changement des mentalités et demande du temps. On distingue trois étapes : 1) une étape de sensibilisation, de dialogue et d'enquête rapide sur les problèmes afin de préciser la perception paysanne de la situation, le développement des dégâts au cours des saisons, les facteurs actifs et les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols ; 2) une étape de démonstration et d'expérimentation chez les paysans volontaires des diverses techniques proposées pour quantifier la gravité des risques, la faisabilité des techniques, leur efficacité et leur coût ; 3) enfin une étape d'évaluation par la communauté (villageois + chercheurs + développeurs) et de planification à l'échelle du terroir, voire d'une région ou d'un petit bassin versant.

Cette approche fait encore l'objet de recherches d'accompagnement, mais elle a déjà donné des résultats intéressants en France (Pas de Calais, Aveyron), au Burkina (Roose, Dugué, Rodriguez, 1992), en Algérie (1985-93), au Rwanda (1988-93), au Cap-Vert (1993-97), au Cameroun (1996-98) et en Equateur (1990-98). Signalons en particulier les recherches sur un nouveau mode de gestion des eaux sur les versants où il s'agit non pas de canaliser le ruissellement vers des exutoires aménagés (qui se transforment inmanquablement en ravines), mais de réduire la concentration des eaux en étalant le ruissellement et en ralentissant la vitesse d'écoulement par augmentation de la rugosité du sol par des micro-barrages perméables tels que des bandes enherbées en Côte d'Ivoire (Roose et Bertrand, 1971), des talus enherbés en Equateur (De Noni et Viennot, 1993), des cordons de pierres au Burkina (Serpantié et Lamachère, 1992) ou encore des haies vives de légumineuses arbustives au Cap-Vert, Rwanda, et Cameroun (Smolikowski et al., 1997; Ndayizigiyé, 1993 ; Roose, 1993; Boli et al., 1996).

LA RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS.

Les pédologues présentent généralement les sols comme une ressource naturelle non renouvelable, ce qui inquiète les écologistes vu la rapidité avec laquelle les sols se dégradent (7 à 10 millions d'hectares par an), la lenteur de l'altération des roches (0,01 mm/an) et la croissance démographique des pays tropicaux (doublement de la population tous les 25 ans). S'il est effectivement irréaliste de vouloir restaurer des sols décuplés jusqu'à la roche lorsque celle-ci est dure, il n'en va pas de même sur certaines roches comme les argilites, marnes, schistes et basaltes qui s'altèrent à raison de 10 à 20 mm par an en régions chaudes et surtout lorsque le sol dégradé comporte



Mini-simulateur
de pluie sur des parcelles
en Equateur.

.....

encore une couche suffisante de matériaux meubles.

Le paradoxe est de parvenir à restituer aux terres dégradées leur capacité de production avant même que l'amélioration de leurs propriétés soit notable lors des analyses classiques. En d'autres termes, s'il est difficile de réhabiliter les caractéristiques d'un sol vierge, il est possible de rendre au sol, en 1 ou 2 ans, sa capacité de production. Il suffit pour cela de respecter les six règles que nous ont indiquées les techniques traditionnelles africaines (voir Zaï au Burkina et terrasses des Mafa au Cameroun) :

- maîtriser le ruissellement et l'érosion du champ par des micro-barrages perméables,
- rétablir la macro-porosité du sol et l'enracinement profond par le travail profond,
- stabiliser la porosité par l'enfouissement simultané de matières organiques,
- revitaliser l'horizon de surface par l'apport de MO fermentées (fumier, compost),
- remonter le pH au-dessus de 5 pour éviter la toxicité aluminique et manganiq,ue,
- assurer la nutrition équilibrée des cultures en complétant la fumure organique par un engrais minéral (un peu d'azote et surtout du phosphore assimilable).

Au Burkina, la production de sorgho sur sols bruns dégradés (zippeles) est passée de 150 kg/ha de grains sur témoin, à 800 kg sur zaï avec fumier et à 1500 kg avec un petit complément minéral (N35+P25+K10 kg/ha/an). En Amérique latine, les sols volcaniques ont souvent des niveaux de cendres plus ou moins soudées (nommés tepetate au Mexique, cangahua en Equateur) : leur broyage, complété par un apport de matières organiques, un complément minéral et un aménagement antiérosif, permet de les remettre en culture en 2 à 5 ans. (Quantin, Prat et Zebrowski, 1993 ; De Noni, Janeau et al., 1994).

CONCLUSIONS

- Bien que l'érosion apparaisse rarement comme titre d'un programme de recherche, de nombreuses études ont été réalisées par une quarantaine de pédologues, géographes, hydrologues et agronomes de l'Orstom depuis 1954.

- Les premières études ont concerné les processus, les facteurs, l'extension spatiale et la quantification de la dégradation des sols par l'érosion en Afrique. Elles s'orientent de plus en plus vers la recherche de solutions aux problèmes de développement rural durable, à l'alimentation en eau de qualité, aux liens entre l'érosion et la pollution de l'environnement, à la prise en compte du milieu humain.

- Une série d'études récentes ont montré qu'il n'est pas utopique de tenter la restauration de la capacité de production des sols dégradés en respectant simultanément six règles édictées par l'observation des techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols. L'analyse plus approfondie de ces techniques permet de découvrir leur complexité, leur variété, leurs limites, leur extension et les possibilités de les améliorer

en les croisant avec des techniques modernes complémentaires. Ces études peuvent améliorer nos connaissances sur le milieu physique et humain.

- Bien que la lutte antiérosive empirique soit très ancienne, il reste de nombreux domaines peu explorés par les scientifiques. Citons à ce propos le coût et les conséquences de l'érosion, la gestion des adventices et autres litières protectrices, les processus du ruissellement et de l'érosion sur fortes pentes, la gestion des eaux excédentaires à l'échelle du versant, les indicateurs de risques d'érosion en nappe, en rigole, en ravine et en masse ; l'érosion mécanique sèche causée par la poussée des outils de culture.

Devant le défi posé par la formidable poussée démographique des pays tropicaux, le domaine le plus urgent paraît être la mise au point de systèmes de gestion durable et intensive de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols ■

Eric Roose, Georges De Noni,

Jean-Marie Lamachère

LCSC et Réseau Erosion du Centre ORSTOM,
BP 5045, F 34032 Montpellier, France

email :

roose@mpl.orstom.fr

denoni@mpl.orstom.fr

lamacher@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Albergel J. 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Doct. Univ. Paris VI, 336 p.

Asseline J. 1997. Le simulateur de pluies type ORSTOM adapté aux zones arides Bull. Réseau Erosion n° 17 : 272-281.

Asseline J. et Valentin C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. Vol. XV n°4 : 321-349.

Avenard J. M. 1989. Sensibilité aux mouvements en masse. Cah. ORSTOM Pédol. 25 (1): 119-130.

Barthès B., Albrecht A., De Noni G., Asseline J., Roose E., Viennot M. 1997. Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron, France), soumis à Etudes et Gestion des

Sols, Orléans.

Billon B. 1968. Mise au point de mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). Cah. ORSTOM Hydrol., 5, 2 : 3-13.

Blancaneaux P., Freitas P. L. de, Amabile R. F. et Carvalho A. M. 1994. Le "zerotillage" et les méthodes alternatives comme pratique de conservation des sols sous végétation de "cerrados" du Goiás, Brésil. Cah. ORSTOM sér. Pédol.

Boli Z., Bep A. et Roose E. 1994. Erosion impact on crop productivity on sandy soils of Northern Cameroun. VII^{ème} conférence Internationale ISCO "Soil and Water Conservation : Challenges and Opportunities", New Delhi, 4-8 décembre 1994. 13 p.

Boli Z., Roose E., Bep Aziem B., Sanon K., Waechter F. 1996. Effets des techniques culturales sur le ruissel-

lement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux. Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun. Cah. Orstom Pédol., 28, 2 : 309-326.

Bonvallet J. 1984. Glissement de terrain et aménagement du milieu naturel dans une montagne méditerranéenne humide (Atatfa en Kroumirie, Tunisie septentrionale. In : Le développement rural en question. Mémoire ORSTOM, 106 : 29-54.

Bonvallet J. 1986. Tabias et jessour du Sud tunisien. Agriculture des zones marginales et parade à l'érosion. Cah. ORSTOM Pédol. 21, 4 : 237-251.

Bricquet J. P., Casenave A., Delfieu J. M. et Gathelier R. 1987. Etude du rapport pluie-débit sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin d'Aghassaghas. ORSTOM, Niamey.



Simulateur
de ruissellement
en Aveyron.

- Carré P.** 1972. Quelques aspects du régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM Hydrol.*, 9, 1 : 19-45.
- Casenave A.** 1982. Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.* Vol. XIX n°4 : 207-227.
- Casenave et Valentin C.** 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *ORSTOM*, Paris, coll. Didactiques. 229 p.
- Charreau C.** 1969. Influences des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion en Casamance. *Agron. Trop.*, 24, 9 : 836-842.
- Charreau C.** 1972. Nécessité agronomique d'une intensification des systèmes agricoles en zone tropicale sèche : ex du Sénégal. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, n° hors série : 204-212.
- Chevallier P. et Valentin C.** 1984. Influence des micro-organismes pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un type de sol sahélien. *Bull. GFHN* n°17 : 9-22.
- Claude J. et Chartier R.** 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne 1975. *Cah. ORSTOM, Hydrol.*, 14, 1 : 3-35.
- Claude J., Francillon G. et Loyer J. Y.** 1977. Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973. *Cah. ORSTOM, Hydrol.*, 14, 1 : 37-109.
- Collinet J.** 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse Doct. Géologie-Pédologie Université. Louis Pasteur, Strasbourg, 28 mai 1988.
- Colombani J.** 1967. Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. *Cah. ORSTOM Hydrol.*, 4, 2 : 27-36.
- Dabin B., Leneuf N.**, 1958. Erosion et ruissellement en basse Côte d'Ivoire. *Orstom* Abidjan, 20 p.
- Delhoume J.P.**, 1981. Ruissellement et érosion en zone montagneuse méditerranéenne semi-aride de Tunisie Centrale (campagnes 1975-79). *Orstom Tunis*, 188 p.
- De Noni G., Viennot M., Trujillo G.**, 1986. L'érosion et la conservation des sols en Equateur. *Cahier Orstom Pédol.*, 22, 2 : 235-245.
- De Noni G., Viennot M., Trujillo G.**, 1990. Mesures de l'érosion dans les Andes d'Equateur. *Cah. Orstom Pédol.*, 25, 1-2 : 183-196.
- De Noni G., Viennot M.**, 1993. Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquences sur la durabilité des agrosystèmes andins. *Cah. Orstom Pédol.*, 28, 2 : 254-277.
- De Noni G., Janeau J.L., Prat C., Trujillo G., Viennot M.**, 1994. Hydrodynamique, érodabilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine. *AISS XV*, Acapulco, Mexique, Vol. 6a : 554-570.
- De Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G.**, 1997. L'homme, la montagne et l'érosion des sols dans les Andes d'Equateur. *Orstom*, Paris, 340 p. sous presse.
- Fauck R.**, 1954. Les facteurs et l'intensité de l'érosion en Moyenne Casamance, Sénégal. In C. R. Congrès Internat., AISS, Léopoldville, Congo belge, tome VI : 376-379.
- Fauck R.**, 1956. Erosion et mécanisation agricole au Sénégal. Bureau des sols en Afrique occidentale, 24 p.
- Fauck R., Moureaux C., Thomann C.** 1969. Bilan de l'évolution des sols de Séfa Casamance, Sénégal, après 15 ans de culture intensive. *Agron. Trop.*, 24, 3 : 263-301.
- Fournier F.**, 1960. Climat et érosion. Thèse de Géographie. Pr. Univ. de France, Paris 201 p.
- Fournier F.**, 1967. La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. *Sols Africains* 12, 1 : 5-51.
- Fritsch J. M.**, 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. *ORSTOM éditions*, Coll. Etudes et Thèses, Paris : 392 p.
- Gac J. Y.**, 1980. Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Coll. ORSTOM Trav. Et Doc.*, n° 123, 250 p.
- Goujon P., Bailly C., de Vergnette J., Benoit de Coignac G., Roche P.**, 1968. Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, 118 : 3-17 ; 119 : 17-26 ; 120 : 27-38 ; 121 : 19-31.
- Guyot J. L.** 1992. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse Doc. Univ. Bordeaux, 362 p.
- Guyot J. L., Bourges J. et Cortez J.** 1994. Sediment transport in the Rio Grande, an Andean river of the Bolivian Amazon drainage basin. In Variability in Stream Erosion and Sediment Transport, Proceedings of the Canberra Symposium, December 1994. *IAHS Publ.* n° 224 : 223-231.
- Hudson N.**, 1992. Land husbandry. B.T. Batsford limited, Londres, 192 p.
- Lafforgue A. et Naah E.**, 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 13, 3 : 195-237.
- Lamachère J.M.** 1991. Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone, proceedings of the Niamey Workshop, February 1991. *IAHS Publ.* n° 199 : 10-119.
- Lamachère J. M. et Puech C.** 1996. Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche. In L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. *IAHS Publ.* n°238 : 235-248.
- Lamachère J.M. et Serpantié G.** 1991. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, région de Bidi. In Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, ed. A. Kergreis et J. Claude. Actes des journées scientifiques du Réseau "génie Parasécheresse" de l'UREF. EIER, Ouagadougou, 165-177.
- Leprun J. C.** 1985. La conservation et la gestion des sols dans le nordest brésilien. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 21, 4 : 257-284.
- Lowdermilk W. C.** 1953. Conquest of the land through 7 000 years. *Agric. Information Bull.* 99. USDA, SCS.
- Marchal J. Y.** 1983. Yatenga : la dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Thèse et Doc n°167, *ORSTOM*, Paris, 873 p.
- Mathieu P.** 1972. Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane sous forêt ; influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). Thèse Doc. Sc. Nat., Univ. Nice, n° A.O. 7838 du CNRS, 20 déc. 1972 : 441 p.
- Meyer L.D.**, 1960. Use of the rainfall simulator for runoff plot research. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24 : 319-322.
- Molinier M.** 1976. Qualité des eaux de surface en zone forestière équatoriale de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 13, 1 : 7-38.
- Monnet Cl.** 1971. Transport en suspension par un fleuve de zone intertropicale (Bandama, Côte d'Ivoire). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 273 : 41-44.
- Morel R. et Quantin P.** 1972. Observation sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari, RCA. *Agron. Trop.*, 27, 6 : 667-739.
- Ndayizigiyé F.** 1993. Effets des haies arbusives (*Calliandra* et *Leucaena*) sur l'érosion et les rendements des cultures en zone de montagne (Rwanda). *Bull. EROSION* 13 : 41-49.
- Nouvelot J. F.** 1972. Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 9, 1 : 47-74.
- Nouvelot J. F.** 1993. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH Ouagadougou, *ORSTOM Montpellier*, 539 p.
- Olivry J.C. et Hoorelbeck R.** 1989. Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch ; bassins sur roubles de Savournon, France. *Cah. Orstom Pédol.*, 25, 1-2 : 95-110.
- Olivry J. C., Bricquet J. P., Thiébaux J. P., Sigha Nkamdjou.** 1988. Transport de matières sur les grands fleuves des régions intertropicales : les premiers résultats des mesures de flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo. *Proc. Porto Alegre Symp. Dec.* 1988. In *IAHS Publ.* 174 : 509-521.
- Olivry J. C., Gourcy L. et Toure M.**, 1995. Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In Grands bas-

- sins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone. Edité par J.C. Olivry et J. Boulégue. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris 22-24 novembre 1993. Coll. Colloques et séminaires : 281-292.
- Olivry J. C., Chouret A., Vuillaume G., Lemoalle J. et Bricquet J. P.** 1997. Hydrologie du lac Tchad. Chap. 2.4-5 : Apports sédimentaires et géochimie. Coll. Monographies Hydrologiques ORSTOM n° 12 : 50-61.
- Orange D., Olivry J. C. et Censier C.**, 1995. Variations et bilans des flux de matières particulières et dissoutes de l'Oubangui à Bangui. In Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone. Edité par J.C. Olivry et J. Boulégue. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris 22-24 novembre 1993. Coll. Colloques et séminaires : 147-158.
- Peugeot C.** 1995. Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentation *in situ* et modélisation. Thèse Doct. Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1 : 356 p.
- Planchon O.** 1991. La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation. In Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Actes des journées scientifiques du Réseau "génie Para-sécheresse" de l'UREF, EIER, Ouagadougou, 12-15 mars 1990 : 59-75.
- Quantin P., Combeau A.**, 1962. Erosion et stabilité structurale du sol. AISH N°59 : 124-130.
- Quantin P., Prat C., Zebrowski C.**, 1993. Erosion et restauration des sols volcaniques indurés " tepetates " de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique. Cah. Orstom Pédol., 28, 2 : 175-186.
- Rochette R. et al.** 1989. Le Sahel en lutte contre la désertification : leçons d'expériences. Collectif : CILLS/PAC, MARGRAF, 592 p.
- Rodier J.** 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. ORSTOM, Paris, 137p.
- Rodier J. A., Colombani J., Claude J. et Kallel R.**, 1981. Le bassin de la Mejerdah. Chap. 2.5 : La qualité des eaux. Coll. Monographies hydrologiques ORSTOM n° 6 : 383-434.
- Roose E.** 1967. Dix années de mesure du ruissellement et de l'érosion à Séfa au Sénégal. Agron. Trop., 22, 2 : 123-152.
- Roose E.** 1973. Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire. Thèse Doct. Ing., Abidjan, ORSTOM : 125 p.
- Roose E.** 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : 20 années de mesures en petites parcelles. ORSTOM Paris, Travaux et Doc. n°78, 105 p.
- Roose E.** 1980. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Orléans, Trav. et Doc. ORSTOM n°130, 569 p.
- Roose E.** 1986. Terrasses de diversion ou micro-barrages perméables : efficacité en milieu paysan pour la CES dans la zone soudano-sahélienne africaine. Cah. ORSTOM Pédol., 22, 2 : 197-208.
- Roose E.** 1992. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols. Influences du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. In "l'aridité", ORSTOM Paris : 481-506.
- Roose E.** 1993. Water and soil fertility management. A new approach to fight erosion and improve land productivity. In " Acceptance of soil and water conservation strategies and technologies "DISTL, Witzenhhausen, RCA : 129-164.
- Roose E.** 1994. Introduction à la GCES Bulletin Pédologique FAO, Rome, n°70, 420 p.
- Roose E.** 1996. Land husbandry : component and strategy. FAO Soil Bull., n°70, 380 p.
- Roose E. et Asseline J.** 1978. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux parcelles d'érosion d'Adiopodoumé : II Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. Cah. ORSTOM sér. Pédol. 16 (1) : 43-72.
- Roose E., Assogba F. et Guillermin C.** 1997. Influence de la fumure organique sur la réhabilitation d'un sol superficiel en vue de la production d'une céréale fourragère dans les Rougiers de Camarès (S. O. France) ; In Bull. EROSION 17 : 134-144 ;
- Roose E., Bertrand R.**, 1971. Contribution à l'étude des bandes antiérosives en Afrique de l'Ouest. Agron Trop., 26, 11 : 1270-1283.
- Roose E., Dugué P. et Rodriguez L.** 1992. La GCES : une nouvelle stratégie de lutte anti érosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Bois et Forêts des Tropiques n°233 : 49-63.
- Rougerie G.**, 1958. Modalité du ruissellement sous forêt dense de Côte d'Ivoire. C.R.Acad. Sciences Paris, 246 : 290-292.
- Rougerie G.**, 1960. Le façonnement actuel des modèles en Côte d'Ivoire forestière. Mémoire IFAN n° 58, 542 p.
- Serpantié G. et Lamachère J. M.** 1992. Contour stone bunds for water harvesting on cultivated land in the North Yatenga region of Burkina Faso. In Erosion, conservation and small-scale farming. Ed. by Hans Hurni and Kebede Tato after the 6th International Soil Conservation Conference of ISCO, 6-18 Nov. 1989. 459-469.
- Servat E.** 1984. Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain. Thèse Doct. Sc. de l'eau, USTL, Montpellier : 182 + 202 p.
- Shaxson F., Hudson W., Sanders D., Roose E., Moldenhauer W.**, 1987. - Land husbandry. WASWC-SCSA, Ankeny USA, 78 p.
- Smolikowski B., Lopez F. M., Querbes, Querido A., Barry O., Perez P. et Roose E.**, 1997. Utilisation du paillage léger et de la haie vive dans la lutte contre l'érosion en zone semi-aride de montagne (Cap-Vert). Bull. Réseau Erosion 17 : 99-110.
- Swanson N.P.**, 1965. Rotating boom rainfall simulator. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 8 : 71
- Thebe B.** 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse Doc. Univ. Montp. 306 p.
- Valentin C.** 1981. Systèmes de production au Sénégal. Evolution de la surface du sol. Piétinement, érosions hydrique et éolienne. ORSTOM, Abidjan, 29 p.
- Verney R., Volkof B., Willaume P.**, 1967. Erosion et ruissellement des terres de Barre au Dahomey. Orstom, Cotonou, 35 p.
- Vuillaume G.** 1969. Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne. Cah. ORSTOM Hydrol., 6, 4 : 87-131.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D.** 1960. A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. Proc. 7th ISSS. Vol.1 : 418-425.
-
- Cahier ORSTOM sér. Pédologie, spécial érosion :**
- "Efficacité des méthodes antiérosives" 1986, n°22, 2 : 119-258.
- "Érodabilité des sols, érodabilité des terres" 1989, n°25, 1-2 : 1-208.
- "Restauration des sols et GCES "1993, n°28, 2 : 147-421.
- Bulletin Pédologique FAO n°70 :**
- "GCES ou Land husbandry" **Bulletins du Réseau Erosion :**
- N°12 1992 : La lutte antiérosive en montagne : RTM et GCES, 463 p.
- N°13 1993 : Influences de l'homme sur les paysages méditer. et tropicaux, 364 p.
- N°14 1994 : Contribution de l'élevage et l'agrofor. à la restauration des sols, 625p
- N°15 1995 : Environnement humain de l'érosion, 612 p.
- N°16 1996 : Etats de surface et risques de ruissellement et d'érosion, 603 p.
- N°17 1997 : Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes ", 534 p.
-
- Eldin M. et Milleville P.** 1989. Le risque en agriculture. Orstom, Paris, 619 p.
- Le Floc'h E., Grouzis M., Cornet A., Bille JC.**, 1992. L'aridité : une contrainte au développement. ORSTOM Paris, Coll. Didactiques 597 p.
- Olivry J.C. et Boulégue J.** 1995. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris 22-24 novembre 1993. ORSTOM Editions, Coll. Colloques et séminaires, 505 p.
- Pontanier R., M'Hiri A., Aronson J., Akrimi N. et Le Floc'h E.** 1995. L'homme peut-il refaire ce qu'il a défilé ? AUPELF-UREF, Orstom Paris, 466 p.

Processus d'érosion

Erosion éolienne au Niger

Dans le Sabel nigérien, à l'échelle du champ, les pertes en terre par érosion éolienne sont supérieures à celles dues à l'érosion hydrique et concernent la partie la plus fertile du sol : sa surface. Cependant, l'essentiel des sédiments n'est déplacé que sur de courtes distances et se dépose en bordure des jachères ou au sein même du champ, augmentant sa variabilité spatiale. A plus large échelle, seules les particules fines sont concernées. Les poussières désertiques, riches en nutriments, se déposent sur le Sabel pendant l'harmattan et peuvent contribuer à fertiliser les sols, mais les pertes subies, d'avril à juillet, lorsque les champs sont dénudés, ne sont pas négligeables. Le bilan des apports atmosphériques est en cours de réalisation dans le cadre du projet PROSE¹.

Événement d'érosion majeur : ligne de grain du 29/05/95.

Variabilité spatiale du champ liée à la dynamique éolienne : croûtes d'érosion rougeâtres stériles et buttes sableuses fertiles.

Depuis 1995, l'Orstom réalise un suivi en continu de profils de vitesses de vent, de flux d'érosion et de dépôts en parallèle sur un champ et une jachère à Banizoumbou (60 km à l'est de Niamey). Ces données récoltées sur près de trois cycles saisonniers permettent une caractérisation détaillée de la dynamique éolienne. Durant presque toute l'année, les vitesses de vent sont élevées, mais il n'y a jamais d'érosion dans les jachères suffisamment végétalisées pour protéger la surface du sol. Il n'en est pas de même dans les champs où l'on observe une forte dynamique des états de surfaces : le taux maximum de couverture végétale est atteint au mois de septembre où le mil et les mauvaises herbes sont à leur développement optimal. On assiste ensuite à une décroissance du pourcentage de recouvrement lié à la récolte des épis de mil puis des tiges et surtout au pâturage par le bétail. Le minimum de recouvrement est atteint au mois de juin, au moment du semis, avant le développement du mil. Cette période correspond aussi aux plus fortes vitesses de vent liées aux lignes de grain. Ainsi, à l'échelle de la parcelle de mil, les pertes en terre par érosion éolienne peuvent atteindre des valeurs considérables (45 t/ha au cours de quatre événements), d'autant plus dramatiques pour la production agricole qu'elles affectent spécifiquement l'horizon de surface de ces sols où l'essentiel des réserves en nutriments est stocké. Cependant, la plus grosse masse des sédiments n'est ainsi mobilisée que sur de faibles distances. Elle se dépose très rapidement, dès l'entrée des jachères et dans le champ lui-même lorsque la couverture du sol est suffisante (litière ou repousse d'arbustes). Cette redistribution de l'horizon de surface au sein du champ conduit à la formation d'îlots de fertilité autour des souches d'arbustes par exemple, mais aussi de surfaces stériles encroûtées qui sont des lieux de genèse pri-

vilégiés du ruissellement puis de l'érosion hydrique. Ainsi la mise en culture prolongée d'un champ conduit à une augmentation de sa variabilité spatiale.

Si cette dynamique éolienne à l'échelle de la parcelle est maintenant relativement bien comprise et quantifiée, il n'en est pas de même à plus large échelle, celle d'un terroir ou d'un degré carré. A ces échelles, c'est la dynamique des particules fines (<50 µm) susceptibles d'être transportées sur de grandes distances



Pour en savoir plus

Rajot J.L., M. Sabre and L. Gomes, 1996. Measurement of vertical fluxes of soil-derived dust during wind erosion events in a Sahelian region (Niger), in B. Burckert, B.E. Allison and M. Von Oppen (eds). Wind erosion in West Africa : The problem and its control. Proc. of Intern. Symp., Univ. Hohenheim, Stuttgart, Germany, 5-7 Dec. 1994, pp 49-56.

Sterk G., L. Hermann and A. Bationo, 1996.

Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. Land degradation and development 7 : 325-335.

Hermann L. 1996. Staubdeposition auf Böden West-Afrikas : Eigenschaften und Herkunftsgebiete der stäub und ihrEinfluß auf Boden und Standortseigenschaften. Hohenheimer Bodenkundlich Hefte 36. Univ. Hohenheim, Stuttgart Germany.

qui doit être prises en compte. C'est l'objectif du programme EDERS², mené en collaboration entre l'Orstom, la faculté des Sciences de Niamey, le LISA³ et le CESBIO⁴, d'effectuer un bilan de ces aérosols terrigènes, très riches en nutriments. Ceci implique de modéliser à la fois l'érosion et le dépôt de ces particules en fonction du type d'état de surface. Cette modélisation doit ainsi permettre de prévoir l'évolution de la dynamique éolienne dans le contexte actuel d'augmentation de pression sur les terres cultivées. Les premiers résultats montrent que, durant la période d'harmattan, dans la zone considérée, on n'enregistre que des dépôts qui correspondent à des poussières d'origine lointaine. En revanche, à partir du mois d'avril avec l'installation du flux de mousson, les principaux événements de dépôt sont directement liés à une érosion locale. Ce sont les pertes en particules fines sur-

venant au cours de ces événements qui sont actuellement en cours de quantification.

Quoiqu'il en soit, il apparaît déjà qu'avec la diminution des surfaces en jachère, si aucune mesure anti-érosive d'ampleur n'est appliquée, les pertes nettes en nutriments des sols sahéliens par érosion éolienne ne feront qu'augmenter, réduisant d'autant les rendements ■

Jean-Louis Rajot

email : rajot@niamey.orstom.ne

1 PROSE : PROgramme de recherche Sols et Erosion

2 EDERS : Erosion et Dépôts Eoliens en Région Sahélienne

3 LISA : Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques

4 CESBIO : Centre d'Etude Spatiale de la Biosphère

Erosion éolienne et apports géochimiques au sol par les poussières atmosphériques en Afrique de l'Ouest et Centrale

Depuis quelques années, les phénomènes de brumes sèches et de vents de sable sont devenus bien plus qu'occasionnels dans l'ensemble des régions tropicales africaines. Ils y constituent désormais un événement climatique saisonnier. Leur étude montre leur étroite interdépendance avec les processus climatiques globaux d'une part, et leur intervention non négligeable sur le cycle géochimique de certains éléments naturels d'autre part.

Dans une optique de caractérisation des apports atmosphériques pour la vie du sol (physiologie de la végétation et structure du sol), trois problèmes étaient à résoudre en fonction des contraintes spécifiques liées à l'environnement africain sahélo-soudanien, tout d'abord mesurer la quantité de poussières atmosphériques se déposant au sol, puis avoir une information sur la qualité de ces poussières se déposant au sol, ensuite trouver un appareil fiable qui soit d'utilisation simple sans risque de panne.

Le capteur pyramidal ou capyr est un appareil simple de mesure des dépôts au sol de poussières atmosphériques. Cet appareil, mis au point à Dakar entre 1986 et 1990, est un piège à aérosols terrigènes qui consiste en une cuve pyramidale renversée de plexiglas, de 40 cm de profondeur avec une surface de réception de 0,25 m². La cuve pyramidale est trouée en son sommet où un tube plastique est fixé, débouchant dans un flacon d'échantillonnage. Le capyr est placé à 5 mètres environ au-dessus du sol sur un support métallique. La cuve en plexiglas est lavée régulièrement (de quotidiennement à hebdomadairement en fonction de l'intensité du phénomène), et à heure fixe, à l'eau distillée pour récupérer dans le flacon les

poussières qui s'y sont déposées. Ensuite, au laboratoire, la fraction insoluble des poussières est recueillie par filtration sur filtre acétate de 0,45 µm de porosité. Ces filtres sont ensuite séchés à 70°C et pesés. La partie soluble est obtenue par analyse du filtrat.

Les dépôts de poussières atmosphériques au sol ont été ainsi observés entre 1986 et 1997 successivement à Dakar (Sénégal), Bangui (RCA) puis Bamako (Mali).

L'intensité du dépôt de poussières atmosphériques suit un gradient négatif de Dakar à Bangui. A Dakar, le dépôt moyen annuel mesuré est de l'ordre de 0,6 g/m²/j pour 0,2 g/m²/j à Bamako et 0,06 g/m²/j à Bangui, soit dix fois moins qu'à Dakar. On retiendra donc qu'il y a un rapport dix entre les dépôts de poussières en zone sahélo-soudanienne et la zone soudano-oubainguienne.

Ce phénomène de dépôts montre une saisonnalité au cours de l'année au même titre que les pluies. Les dépôts les plus faibles sont toujours observés en saison des pluies, de août à novembre (entre 0,2 g/m²/j et 0,01 g/m²/j selon la zone climatique considérée). Le pic annuel de dépôts de poussières (1 g/m²/j à Dakar, 0,3 g/m²/j à Bamako et 0,1 g/m²/j à Bangui) est souvent associé aux plus forts vents d'harmattan, soit en janvier-février-mars. Cependant, on note également une pointe de dépôts de mai à juillet expliquée par de fortes remobilisations locales ou sous-régionales (contribution des sols dans un rayon de 100 km) liée aux forts vents turbulents accompagnant le passage de la ligne de grains. On note sans encore l'expliquer que ce phénomène est beaucoup plus marqué au Mali que sur les deux autres sites étudiés, le dépôt pouvant alors atteindre plus de 0,2 g/m²/j.



Front de poussières atmosphériques à Matam (Sénégal) en juin 1986 précédant une ligne de grains.



Événement de fort dépôts de poussières atmosphériques sur la route Podor-Matam (Sénégal) en janvier 1988 recouvrant entièrement le goudron et provoquant l'arrêt de la circulation routière.

L'aspect majeur qui nous a intéressé dans l'étude des dépôts de poussières atmosphériques est leur contribution à l'acquisition du chimisme des eaux de pluie, du fait de la solubilisation de formes minérales devenant alors directement assimilables par les éléments du sol et pouvant jouer ainsi un rôle sur le développement végétatif et/ou la conservation de la structure du sol. En effet, 25% des retombées annuelles de poussières se produisent pendant la saison humide et par simple effet de self-cleaning au cours de la tombée de la pluie une part importante des poussières en suspension dans l'air se dissout pour finalement donner aux pluies africaines de la zone sub-saharienne un faciès chimique caractéristique. Les poussières atmosphériques sont surtout siliceuses mais ont également des teneurs importantes en bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et contiennent de la matière organique qui apporte phosphate et nitrate. Ceci suffit à expliquer les teneurs élevées en silice, bases échangeables, phosphate, nitrate et bicarbonate des pluies d'Afrique de l'Ouest et Centrale. On retiendra que la charge totale moyenne des apports dissous en milieu continental (à plus de 300 km des côtes marines pour se soustraire de l'influence des apports salins) va de 16 mg/l en zone soudano-sahélienne à 6 mg/l en zone soudano-oubanguienne.

Toutes espèces ioniques confondues, le bicarbonate est largement l'ion dominant. Il représente en masse de 40 à 50% des apports dissous au sol selon la zone climatique considérée. Le cation majeur est le calcium dont l'apport au sol est de l'ordre de 12 kg/ha/an à 3 kg/ha/an, entre respectivement la zone soudano-sahélienne et la zone soudano-oubanguienne. Le potassium et le sodium ont un apport intermédiaire dont l'intensité de l'apport est également fonction du biotope régional. La quantité de silicium déposée au sol est équivalente à celle du magnésium, qui est tou-

jours le cation minoritaire avec un apport de 2 à 0,3 kg/ha/an. Au niveau des anions, à l'exception du bicarbonate largement majoritaire, les chlorures sont les plus abondants avec un dépôt de l'ordre de 11 à 2 kg/ha/an en fonction de la zone climatique, on trouve ensuite les nitrates et sulfates de 7 à 2 kg/ha/an. Enfin, il est intéressant de noter que en zone soudano-oubanguienne le chimisme de la pluie est également influencé par les émissions de la forêt tropicale et des feux de savane très intenses dans cette dernière zone géographique. Ceci est très sensible au niveau du pH des eaux de pluie, qui de toujours fortement basiques en zone soudano-sahélienne du fait de la présence de poussières atmosphériques uniquement terrigènes, peuvent être fortement acides en zone soudano-oubanguienne du fait des émissions atmosphériques végétales riches en acides organiques.

Le capyr est un appareil simple, facile de fabrication et d'utilisation fiable qui permet de réaliser une approche géographique comparative de l'intensité et de la qualité des apports atmosphériques au sol. Afin de préciser le bilan nutritif de ces apports à l'échelle de l'agro-écosystème, il convient d'axer les recherches sur la contribution respective des zones sources effectives et des apports liés à la remobilisation d'une part, et sur la quantification des pertes liées à l'érosion éolienne d'autre part ■

Didier Orange⁽¹⁾, Clément Feizoure⁽²⁾
et Camara Guimba⁽³⁾

email : orange@lecom.malinet.ml

(1) LECOM / Orstom, BP 84, Bamako (Mali)

(2) Direction Nationale Météorologique, BP 893, Bangui (Centrafrique)

(3) ENSup, BPE 3206, Bamako (Mali)

Pour en savoir plus

Orange D., Gac J.Y., Probst J.L., Tanre D. 1990 - Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques, une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal. C.R. Acad. Sc. Paris, 311, Série II, p.167-172.
Orange D., Gac J.Y. 1990 - Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaines sahélien et soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest (bassins supérieurs du Sénégal et de la Gambie). Géodynamique, Paris, 5 (1), p.51-65.
Orange D., Gac J.Y.,

Diallo M.I. 1993 - Geochemical assessment of atmospheric deposition including Harmattan dust in continental West Africa. IAHS Publ, Proceedings of Yokohama Symposium, 215, p.303-312.
Orange D., Camara G., Greard M. 1998 - Premiers bilans de la dynamique actuelle des dépôts de poussières atmosphériques en zones sahélienne et soudanienne. Rapport IDAF Mali, LECOM/Orstom, Bamako, 35 p.

Ravinement des terres noires de Haute Provence

Une étude de l'Orstom et du BRGM sur l'estimation des bilans d'exportation de matières solides en zones sensibles à l'érosion a été réalisée de 1984 à 1988 sur plusieurs bassins représentatifs de la moyenne Durance et de la vallée du Buëch. L'objectif principal consistait à déterminer une méthode de calcul simple pour évaluer, dans des régions à forte érodabilité (marnes et pentes fortes) et à saisons contrastées, le comblement de retenues par les transports solides, méthode susceptible d'être utilisée par les aménagistes des pays méditerranéens et en particulier d'Afrique du Nord.

L'expérimentation a consisté à suivre les exportations de sédiments aux exutoires de bassins emboîtés à Savournon (75 et 7,8 ha) et sur d'autres bassins de caractéristiques voisines (Mison, St. Genis et Saignon) dont le substratum constitué des marnes noires du Callovo-Oxfordien (Jurassique supérieur) est dans des proportions variables profondément disséqué par des ravines d'érosion sans végétation, faiblement végétalisées sur certains versants ou recouvert d'une strate herbacée sur les replats. La compréhension des processus mis en oeuvre dans l'érosion de ces régions s'est appuyée sur l'étude de versants, de parcelles et de ravines élémentaires. Celle-ci a montré que l'érodabilité des marnes noires dépendait de l'exposition et de la pente des versants, de leur orientation par rapport au pendage, de leur pétrographie (calcimétrie et % argiles gonflantes) de l'épaisseur de l'altérite et de la mobilisation du matériau (alternances gel-dégel, épisodes de dessiccation, limites d'Atterberg).

Le potentiel érosif est lié au niveau d'intensité et d'énergie des averses, à l'apparition du ruissellement, à l'imbibition en profondeur, à la compétence des ruisselets, au stockage des matériaux sur les versants et dans les drains primaires et à leur déstockage suivant l'importance de l'écoulement de crue. L'analyse de l'échantillon averses-crues a montré que les exportations de matière étaient mal corrélées aux événements pluviométriques ponctuels et que seuls des pas de temps plus grands (bilan annuel) permettaient d'intégrer d'autres phénomènes d'érosion, différés dans le temps (solifluxion, érosion rampante, éboulements, microcoulées de boues et laves torrentielles).

Les résultats comparés entre bassins ont permis de caractériser l'exportation annuelle sur ravines non végétalisées en fonction de la précipitation annuelle.

Les mesures faites sur microprofils des versants montrent une lame érodée annuelle variant de 5 à 16 mm suivant la pente, en moyenne de 8 mm et en parfaite cohérence avec la dégradation spécifique de 100 t/h/km² qui caractérise les marnes noires du Jurassique supérieur des Alpes du Sud. Le développement de telles mesures sur les versants dénudés, faciles à mettre en oeuvre, et leur traitement statistique peu-

vent constituer une réponse économique à la caractérisation de l'érosion-type des marnes d'un milieu donné.

Dans la continuité de ces travaux, le Cemagref poursuit depuis douze ans des études approfondies sur l'érosion des marnes noires de Haute-Provence (bassins de Draix près de Dignes), l'Orstom ayant reporté ses efforts au sud de la Méditerranée ■

Jean-Claude Olivry et Jacques Hoorelbeck

email : olivry@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Olivry J.C., Hoorelbeck J., 1990. - Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du Sud). Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXV, n° 1-2, 1989-90 : 95-110
Bufalo M., Oliveros C., Quelennec R.E., 1988. L'érosion des Terres Noires dans la région du Buëch. Contribution à l'étude des processus

érosifs sur le bassin versant représentatif de St. Genis. in Journée " Transports solides " de la SHF- Paris. 12 p.
Osterkamp W.R., 1995. - (ed.sc.) - Effects of scale on interpretation and management of sediment and water quality. (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995). IAHS Publ. n° 226, 301 p.

Ravines d'érosion de Mison disséquant une butte avec couverture claire de chênes rouvres.



Une vue des ravines en tête de bassin à Savournon (photo prise en ULM).



Bilans d'érosion à l'échelle sous-continentale : les exportations de matière sur le bassin du fleuve Congo-Zaïre

L'Orstom a entrepris dès 1986 des études sur le fonctionnement bio-géo-hydrodynamique du bassin du fleuve Zaïre, le deuxième hydrosystème continental mondial par sa superficie (3 600 000 km²) et son débit moyen de 40 800 m³/s, situé de part et d'autre de l'équateur. Ces études se sont développées en association avec l'INSU dans le cadre du projet sur l'environnement de la géosphère intertropicale.

Un bilan des transports et une décomposition des flux de matière ont été établis à la station de Brazzaville pour la période 1987-1992 à partir d'un protocole de prélèvement et de traitement des échantillons basé sur un suivi précis de la variabilité de la charge du fleuve dans la section de mesures et dans le temps (fréquence mensuelle, hebdomadaire, voire journalière).

La concentration moyenne interannuelle est de 76,2 mg/l dont 25,8 mg/l en transports particuliers et 50,4 mg/l en transports dissous, valeurs très faibles par rapport aux autres grands fleuves de la planète. Les suspensions du Congo-Zaïre se décomposent en une fraction grossière ou sableuse (granulométrie supérieure à 50 µm) et une fraction fine comprise entre 0,2 et 50 µm dont la part revenant à la matière organique particulaire est de 12%. La partie dissoute est composée de matière organique pour 18,5 % et de matière minérale pour 47,6% (avec 26% de silice et 42% de bicarbonates), soit 66 % de la charge totale.

En terme de bilan, ce sont près de 92 Mt de matières qui sont exportées annuellement dont 31 Mt de matières en suspension et 61 Mt de matières dissoutes (dont 44 Mt pour la fraction minérale et 17 Mt pour la fraction organique). Les valeurs spécifiques de ces flux moyens sont respectivement de 26,3 t/km²/an pour le flux global, de 12,1 t/km²/an pour l'exportation chimique minérale, de 8,8 t/km²/an pour les flux issus de l'érosion mécanique et 5,4 t/km²/an pour la matière organique dissoute. L'importance de la couverture forestière sur le bassin rend compte de la faible part prise par l'érosion mécanique. L'érosion chimique des roches est essentiellement le fait de l'attaque des minéraux par l'acide carbonique directement issu du CO₂ atmosphérique. Le flux de CO₂ consommé dans l'altération des roches a été estimé à 210 milliards de moles par an, ce qui représente 75% des bicarbonates, les 25% restant provenant des roches carbonatées des crypto-karsts de l'Oubangui et du Sud-Zaïre. Le flux annuel de carbone minéral dissous a été estimé à 3 Mt ; il est de 1,6 Mt pour le carbone organique particulaire et de 11,4 Mt pour le carbone organique dissous.

L'étude des variations saisonnières de la charge solide du fleuve ne montre pas pour les suspensions de cycle annuel significatif du fait de débits composites provenant des apports sud et nord équatoriaux. En revanche, les transports minéraux dissous montrent de plus faibles concentrations pendant la période de crue (décembre-janvier). Inversement, c'est pendant la crue principale du fleuve que l'on observe les plus fortes concentrations en matière organique dissoute (jusqu'à 30 mg/l), matière organique provenant essentiellement du "rinçage" de la forêt inondée de la cuvette congolaise.

Des études détaillées (granulométrie, minéralogie, spéciation en chimie minérale et organique, traceurs) ont permis de modéliser les exportations de matière en fonction du régime hydrologique du fleuve. Ce type d'étude, qui constituait une première dans le cas du Zaïre, a été développé depuis quelques années sur l'Amazonie dans le cadre des projets PEGI puis PROSE ■

Jean-Claude Olivry, Jean-Pierre Bricquet,
Alain Laraque, Orstom Montpellier
et Bienvenu Maziezoula,
DGRST Congo Brazzaville

email : olivry@mpl.orstom.fr

Les rapides du fleuve
Congo-Zaïre en aval de
Brazzaville.



Photo : Jean-Claude Olivry



Photo : Jean-Claude Olivry

Pirogues sur le fleuve
dans le couloir de Maluku-
Tréhot.

Pour en savoir plus

Laraque A., Olivry J. C., 1996. - Evolution de l'hydrologie du Congo Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique des transports solides et dissous - Actes de la Conférence " L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement ", Paris 1995. Publ. AISH n°238 pp. 271-288.
Moukoko N., Bricquet J. P., Biyedi J., 1990. - Bilans et variations des exportations de matière sur le Congo à Brazzaville - Hydrol. Continent. 5 (1), pp. 41-52.

Olivry J. C., Boulegue J., (Ed. Sc.), 1995. - Grands bassins fluviaux péri-atlantiques : Congo, Niger, Amazone - Actes du Colloque PEGI (Insu-CNRS-Orstom) 22-24 novembre 1993, Paris, Coll. Orstom Colloques et Séminaires 383 p.
Probst J. L., Nkounkou R. R., Kremp G., Bricquet J. P., Thiebaux, J. P., Olivry J. C., 1992 - Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangi rivers during the period 1987-89 - J. Hydrol. 135, pp. 237-257

Transferts et dépôts de matière dans le delta intérieur du fleuve Niger au Mali

Le programme sur l'environnement et la qualité des apports fluviaux du Niger au Sahel, EQUANIS, s'est attaché à mettre en place depuis 1990 au Mali un réseau de stations d'observation des flux hydriques et de matières particulaires et dissoutes et à développer sur le delta intérieur du Niger des recherches sur son fonctionnement hydrogéodynamique qui conditionne une relative concentration des ressources naturelles renouvelables. De celles-ci, liées dans une très large mesure à la présence de l'eau, dépendent directement les activités de production des hommes (pêche, agriculture, élevage) et l'évolution de l'équilibre homme/hydrosystème. Le delta intérieur constitue un vaste ensemble d'environ 50 000 km² comprenant lacs et plaines d'inondation où les pertes annuelles, dues essentiellement à l'évaporation, varient de 40 km³ à 6 km³, soit 47 % des entrées en période humide et seulement 30 % en période sèche du fait de la réduction des zones inondées.



L'étude des matières en suspension dans les eaux des bassins amont indique des variations saisonnières des concentrations caractéristiques des fleuves tropicaux (dépassant rarement 100 mg/l pour le Niger et 200 à 250 mg/l pour le Bani, au début de la saison des pluies, et tombant en saison de basses eaux jusqu'à 5 mg/l. En termes d'érosion spécifique, la dégradation moyenne annuelle varie de 6 à 12 t/km²/an pour le Niger à Banankoro et de 2,3 à 7,3 t/km²/an seulement, pour le Bani à Douna. Les plus fortes valeurs correspondent à l'année 1994-95 qui a vu le flux de matières particulaires passer à 2,3 Mt, contre 1 Mt en 1992-93.

L'étude des transports des matières dissoutes montre des concentrations comprises entre 30 et 80 mg/l pour le Niger à Banankoro, et entre 20 et 100 mg/l pour le Bani à Douna, avec les plus fortes concentrations en fin de saison sèche et un minimum dès le début de la montée de la crue. Les flux spécifiques de matières dissoutes observés sont de l'ordre de 11 à 20 t/km²/an sur le Niger à Banankoro, et seulement de 2,6 à 5 t/km²/an sur le Bani à Douna. Comme pour les suspensions, les concentrations moyennes varient peu d'une année à l'autre et l'importance du flux de matières est d'abord liée à celle du flux hydrique. Le flux de matières dissoutes parvenant au Delta est de 1,2 Mt pour 1992-93 et de plus de 2 Mt pour 1994-95.

Dans la traversée du delta intérieur, les mesures faites à Diré, à l'aval, ont montré, pour les années caractérisant l'appauvrissement de la ressource en eau depuis deux décennies, qu'environ le quart des charges en suspension et dissoutes se déposait dans le delta

Pour en savoir plus

Bricquet J. P., Mahe G., Bamba F., Diarra M., Mahieux A., Tureaux T. des, Orange D., Picouet C., Olivry J. C., 1997. Erosion et transport particulaire par le Niger : du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observations). Friend'97 - Regional hydrology : Concepts and models for sustainable water resource Management (Proceedings of the Postojna, Slovenia Conference, sept-oct. 1997) IAHS Publ. n° 246, pp. 257-263

Gourcy L., 1994. Fonctionnement hydro-géochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : bilans et suivi des flux hydriques, particulaires et dissous et des flux de méthane. Thèse de doctorat de l'Université Paris XI Orsay.

Grove A.T., 1972 - The dissolved and the solid load carried by some West African rivers : Senegal, Niger, Benue and the Shari. J. Hydrobiol., vol. 16, pp. 277-300

Olivry J. C., 1998. Hydrologie et géochimie du bassin soudano-sahélien du fleuve Niger. Actes du Colloque International Hydrologie et Géochimie Isotopiques en hommage à J.Ch. Fontes. Paris, Académie des Sciences, juin 1995. 20p.

Olivry J. C., 1995 Aspect of the lasting degradation of water resources in the Sahelian basin of the Niger river. Impact on the renewable resources in Mali - XIXth IUGG-IAHS General Assembly, Boulder (USA), July 1995. 15p.

Un aspect de la plaine inondée du delta intérieur du Niger vers le lac Débo.

intérieur (soit 0,55 Mt pour un flux global d'entrée de 2,2 Mt en 1992-93, année-type). L'année 1994-1995, d'hydraulicité plus forte, est marquée par des dépôts plus importants totalisant près de la moitié des apports amont, dont 40% de la charge en suspension. Avec une épaisseur de dépôt de l'ordre de 0,04 mm par an, le delta intérieur du Niger ne peut être considéré comme un réel bassin sédimentaire.

Les mesures intermédiaires effectuées aux sorties du Lac Débo montrent un comportement très différent des parties amont et aval du Delta intérieur. Alors que les pertes en sels évoluent de manière comparable, induisant une salinisation des sols en bordure du delta, les dépôts de matières en suspension caractérisent essentiellement le delta amont. Il y a décantation dans les plaines d'inondation de la zone amont (de 32 à 55% de la charge solide) et des phénomènes de reprise et d'apports d'origine saharienne dans la zone aval excédant largement la décantation. En effet, le bilan

annuel met en évidence un piégeage de 0,33 Mt et 1,3 Mt de suspensions avant le lac Débo et au contraire un gain de 0,09 Mt et 0,38 Mt entre le lac Débo et Diré, respectivement en 1992-93 et 1994-95. Le bilan mensuel des flux de matière en suspension établi pour le delta amont et le delta aval précise le fonctionnement saisonnier des phases de sédimentation et de reprise des dépôts.

Les travaux s'orientent vers une modélisation de ces flux de matières et des recherches spécialisées sur la qualité des matières transportées (minéralogie, sédimentologie et chimie) ■

Jean-Pierre Bricquet, Jean-Claude Olivry,
Cécile Picouet et Didier Orange,
Orstom-Montpellier

email : olivry@mpl.orstom.fr

Encroûtement superficiel au Sahel

La concentration des ressources en eau, en graines et en éléments fertilisants est rendue possible même, pour des pentes très faibles, grâce à la formation de croûtes superficielles dans les bandes nues qui alternent avec les fourrés de la " brousse tigrée ". Région de Niamey, Niger.



L'érosion comprend plusieurs mécanismes : le détachement, le transport et le dépôt. Or, le plus souvent, ni le ruissellement, ni le vent, ne sont capables d'entraîner les agrégats du sol. Au préalable, ceux-ci doivent nécessairement être fractionnés, soit en micro-agrégats, soit en particules élémentaires (sable, limon, argile). Ce fractionnement résulte de l'impact des gouttes de pluies sur le sol, ou du choc des particules entraînées par le vent. Les produits de ce frac-

tionnement peuvent être réorganisés sur place, sous la forme de croûtes superficielles, ou bien être emportés par le ruissellement ou le vent. Dans les zones arides et semi-arides, le faible couvert végétal, fragilisé par les sécheresses et l'action de l'homme et de son bétail, n'est généralement pas suffisamment continu pour protéger efficacement le sol contre l'action de la pluie et du vent. Dès lors, les surfaces ont tendance à s'encroûter, ce qui favorise le ruissellement et l'éro-

sion des sols situés en aval. Depuis une vingtaine d'années ces processus ont été étudiés par les pédologues et les hydrologues de l'Orstom et leurs partenaires en Afrique de l'Ouest en utilisant des simulateurs de pluies sur le terrain.

Ces travaux ont démontré la diversité des croûtes superficielles (structurales, d'érosion et de dépôts) qui constituent, avec la végétation, les constructions fauniques et la rugosité, les états de surface du sol. L'utilisation de cartes d'états de surface fournit une aide précieuse à la modélisation du ruissellement généré sur des bassins versants dont la superficie varie de quelques hectares à plusieurs dizaines de km².

Il convient de noter que les croûtes superficielles ne présentent pas que des aspects négatifs. Elles favorisent la concentration des ressources (eau, éléments nutritifs, graines, ...), condition nécessaire au développement et de la survie de la végétation dans les zones à pluviosité réduite et aléatoire. Ainsi, la production de biomasse mesurée dans les brousses tigrées au Niger, formées de l'alternance de bandes très encroûtées et de fourrés, est le double de celle d'une végétation arborée plus diffuse située dans les mêmes conditions climatiques. Ces croûtes superficielles constituent souvent de vastes impluviums à l'amont des versants qui contribuent également à l'alimentation hydrique des plantes cultivées et à une meilleure efficacité des éléments fertilisants à l'aval. Au demeurant, la plupart des techniques efficaces de lutte contre l'érosion au Sahel, plutôt que de chercher à détruire ces croûtes, ce qui le plus souvent se révélerait illusoire, cherchent au contraire à en tirer partie. Tel est le cas par exemple du zaï qui permet la concentration très localisée des ressources provenant de surfaces généralement encroûtées. Un autre principe consiste à recouvrir les croûtes par des résidus végétaux, ou des branchages, qui attirent les termites et piègent les sables et les graines. Cette technique s'avère généralement efficace pour reconstituer des conditions favorables au couvert végétal et restaurer ainsi, très localement, des surfaces très encroûtées.

En fait, les croûtes superficielles constituent des éléments clefs des paysages sahéliens. Dans les régions cuirassées, elles servent d'indicateurs de la dégradation des sols, et donc de la désertification. Dans le domaine sableux, leur fonction est plus ambivalente puisque tout en favorisant l'érosion hydrique, notamment sous forme de ravines, elles permettent la collecte et la concentration des eaux de pluies qui, si elles étaient uniformément réparties, seraient souvent insuffisantes pour assurer le développement de la végétation et la production de plantes cultivées ■

Christian Valentin
Orstom, Valentin@paris.orstom.fr



Pour en savoir plus

Casenave A., Valentin C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in the arid and semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130:231-249.

Casenave A., Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Paris, Orstom, 230 p.

d'Herbès J.M., Valentin C., 1997. Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 188-189 : 18-42.

Rockström M., Valentin C., 1997. Hillslope dynamics of on-farm generation of surface water flows: the case of rainfed cultivation of pearl millet on sandy soil in the Sahel. *Agricultural Water*

Management, 33:183-210.

Thiery J., d'Herbès J.M., Valentin C., 1995. A model for simulating the genesis of banding patterns in Niger. *Journal of Ecology*, 83:497-507.

Valentin C., Bresson L.M., 1992.

Morphology, genesis and classification of soil crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55:225-245.

Valentin C., Casenave A., 1992. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Science Society of America Journal*. 56(6):1167-1673.

Valentin C., d'Herbès J.M., sous presse. Water harvesting along a climatic transect across tiger bush patterns in Niger: structure, slope and production. *Catena*.

La formation de croûtes superficielles sur les dunes fixées du Sahel provoque un ruissellement sur des sols pourtant très sableux. Cette concentration du ruissellement occasionne la formation de ravines mais permet la concentration et un meilleur développement de la végétation arborée dans les points bas. Ferlo sableux, Sénégal.

Modélisation du ruissellement et de l'érosion sur les champs cultivés

Un test récent de plusieurs modèles d'érosion à l'échelle du petit bassin-versant agricole montre que, malgré des performances honorables du point de vue des écoulements, les modèles ne peuvent pas garantir mieux qu'un facteur 10 dans la prédétermination des pertes en terre. Les auteurs des modèles testés ont unanimement mis au premier plan des priorités de recherche une meilleure prise en compte de l'influence du travail du sol sur la direction des écoulements.

Un rugosimètre électronique.

Dans le bassin arachidier du Sénégal, les rendements baissent chaque année pour atteindre en 1997 la moyenne nationale de 685 kg/ha⁽¹⁾, soit moins de 5 fois le poids de la semence. L'irrégularité des précipitations est le premier facteur de perte de récolte, si bien qu'une meilleure gestion de l'eau apparaît comme une véritable priorité.

Les sols, sableux en surface, sont exploités par culture attelée. Au début du cycle de culture, le sol est désherbé par des passages successifs qui, en contrepartie, maintiennent une rugosité sous forme de billons orientés plus ou moins perpendiculairement à la pente ; à partir de la floraison, le travail du sol n'est plus possible et les billons s'érodent. L'influence de ce micro-relief et de son évolution sur le ruissellement et l'érosion du bassin versant sont déterminantes mais nous ne savons pas encore les évaluer de manière fiable.

Ainsi, les plaines limoneuses du Nord de l'Europe et les champs d'arachide du Sénégal présentent-ils une problématique commune : la nécessité d'une meilleure prise en compte des caractéristiques locales du micro-relief pour mieux connaître les propriétés globales d'une parcelle vis-à-vis de l'infiltration, du ruissellement, et de l'érosion

Un rugosimètre électronique, conçu et réalisé au Centre Orstom de Dakar, a permis de suivre le micro-

relief de trois parcelles au cours d'un cycle complet de culture. L'appareil permet la mesure de 16 m² au pas de 5 cm, avec une précision millimétrique et une excellente reproductibilité des mesures.

Les parcelles ainsi que le bassin-versant qui les contiennent sont par ailleurs instrumentés pour les mesures de la pluie, de l'humidité du sol et des débits liquides et solides.



Le micro-relief de chaque parcelle, mesuré après chaque averse et chaque travail du sol, est traité numériquement pour fournir des données représentatives du champ qui contient la parcelle : capacité de rétention d'eau et direction de l'écoulement, ceci dans toutes les conditions de direction et d'orientation de la pente.

Les perspectives actuelles de ce programme de recherche consistent à intégrer cette nouvelle connaissance du rôle hydraulique du micro-relief des champs cultivés dans les modèles de ruissellement actuels et de valider cette démarche par des expériences appropriées de simulation de pluie sur des grandes parcelles ■

Olivier Planchon, Michel Esteves, Norbert Silvera
ORSTOM, B.P. 1386 Dakar, Sénégal
email : olivier.planchon@orstom.sn

(1) Source : ministère de l'Agriculture du Sénégal

Sarclage de l'arachide sur la parcelle de mesure.



Pour en savoir plus

De Roo A.P.J. editor (en préparation) **Modelling Soil Erosion at the Catchment Scale.** Proceedings of GCTE Utrecht Workshop. CATENA Special Issue. **Moore I. D. and Laron C. L.** (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. Trans. ASAE, 22, 1073-1077. **Planchon O., Esteves**

M., et Silvera N. (1998). Le micro-relief d'un sol sarclé : mesure, modélisation et conséquences sur le ruissellement et l'érosion. 16ème congrès international de science du sol. AISS. 7p + poster. **Römkens M. J. M. and Wang J. Y.** (1986). Effect of tillage on roughness. Trans. ASAE, 29, 429-433.

Remplissage et envasement des petites retenues au Nord-Mexique

Au Nord-Mexique, en raison de conditions climatiques semi-arides à forte variabilité, l'élevage bovin est l'activité agricole dont la réussite est la moins aléatoire. L'abreuvement du bétail y est assuré par de petites retenues d'eau (presones), temporaires lorsqu'elles sont alimentées par les ruissellements superficiels. Les principaux problèmes posés par ces petits barrages sont leur remplissage et la pérennité du plan d'eau, leur envasement et la durabilité des ouvrages.

Les recherches en cours s'intéressent aux petites retenues du ranch Atotonilco (450 km², Etat de Durango), situé dans la bande des 450 mm de précipitations pluviales annuelles. Le relief y est contrasté entre les glacis, les collines et les reliefs (pentes de 3 à 50%). Les sols de profondeur très variable et la végétation naturelle de type matorral à épineux et cactus, sont assez bien conservés grâce à une bonne gestion du pâturage. Sur la cinquantaine de petits barrages recensés, sept (15 à 400 ha.) ont été sélectionnés de manière à représenter les différentes litho-morphologies régionales : les reliefs rhyolitiques, volcano-sédimentaires (toba) ou calcaires ; les collines basaltiques ou conglomératiques ; les glacis à croûte calcaire indurée (caliche), ou à colluvions.

Des mesures climatiques associées à des dispositifs d'enregistrement hydro-pluviométriques en continu et à des levés topographiques précis (un point tous les 5 m.) destinés à tracer les courbes cotes-surfaces et cotes-volumes de chaque retenue ont permis d'appréhender le fonctionnement des impluviums et d'établir le bilan en eau et en sédiments des réservoirs.

Sur les impluviums, pour une année à hydraulicité moyenne (pluies à intensité supérieure à 10 mm/h, année 1996), les coefficients annuels d'écoulement sont de 3 à 4% sur les reliefs à rhyolites, toba, ou calcaires, de 2 à 3% sur les bassins dont les reliefs sont prolongés par des glacis à caliche ou par des colluvions. Ils sont inférieurs à 0,5% sur les bassins basaltiques ou conglomératiques. A l'échelle des crues, les coefficients de ruissellement croissent de 5 à 25% quand l'intensité moyenne des pluies passe de 10 à 40 mm/h.

Sur les retenues, les mesures ont montré que, en dehors des déversements qui peuvent atteindre 40% des écoulements annuels, l'évaporation était généralement la cause principale des pertes en eau (4 à 8 mm par jour selon la saison, soit 2 à 2,6 mètres par an). Une autre cause importante de perte en eau peut aussi être la perméabilité du fond des cuvettes. En l'absence de colmatage, elle est très forte sur basaltes et conglomérats (infiltration de 100 mm par jour) ; elle est plus faible sur les autres matériaux (20 mm

par jour). Après colmatage du fond des retenues par dépôt de sédiments fins (44 à 66% d'argile), l'infiltration n'est plus que de 4 mm par jour.

Les quantités de sédiments apportées dans les retenues par les crues de l'année 1996 ont été de 2,5 tonnes par hectare pour les bassins aux pentes finales fortes (20%) juste en amont des retenues, de 1 à 2 tonnes par hectare pour les bassins aux pentes finales faibles (3 à 7%). La comparaison entre les volumes écoulés et les volumes de sédiments transportés montre que la concentration moyenne des eaux de crue varie de 7 à 23 g/l.

Le choix des bassins-versants et le positionnement des barrages dans les lithologies est important : les impluviums sur basalte et conglomérats sont très peu ruisselants et, en outre, les retenues installées sur ces matériaux ne retiennent pas l'eau si elles ne sont pas colmatées par des sédiments. Le sous-dimensionnement des réservoirs occasionne parfois des pertes importantes par déversement, diminuant d'autant la durée de la disponibilité en eau. Les pertes en terre sont faibles (1 à 2,5 t/ha) par rapport à celles mesurées sous climat méditerranéen ; elles contribuent à l'imperméabilisation des retenues sans trop affecter leur durée de vie qui peut être estimée entre 25 et 50 années sous ces conditions de bonne gestion pastorale. Cette érosion spécifique resterait à comparer à celle constatée sous gestion communautaire avec une charge pastorale nettement moins contrôlée ■

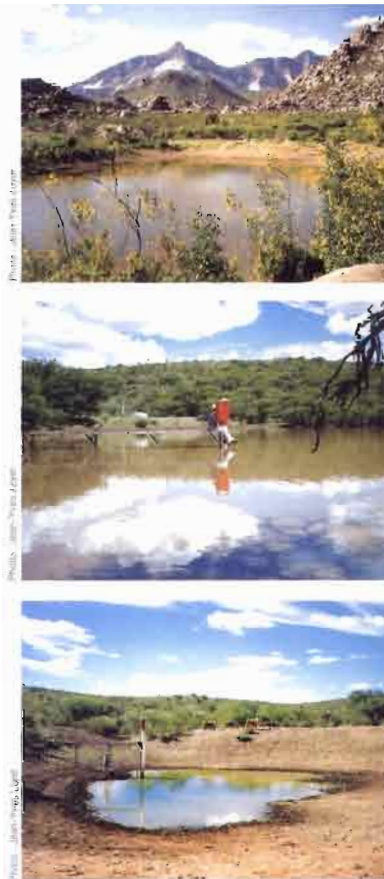
Juan Estrada, INIFAP, Mexique,
Jean-Marie Lamachère, Jean-Yves Loyer
et Jean-Pierre Thiébaux, Orstom

email : lamacher@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Loyer J.Y., Estrada A.J., Jasso R.I., Moreno D.L., 1993 - Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. Orstom/Cenid Raspa. Gómez Palacio (Dgo), México, 380 p.
Nouvelot J.F., Descroix L., 1996 - Aridité et sécheresse du Nord-Mexique. Revista Trace. México, déc. 96 n° 30 : 9-25.

Estrada Avalos J. - Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. Thèse en cours, Université Montpellier II, 1998.
Albergel J., Rejeb N., 1997 - Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. C.R. Acad. Agric. France, 19 mars 1997, 83, n° 2 : 77-88.



Le petit preson de Dinamita installé sur des matériaux éruptifs très filtrants

Le preson d'El Viejo et ses équipements de mesures : limnigraphe et bac d'évaporation

La retenue de Carboneras en milieu de saison sèche

Les lacs collinaires, infrastructures pour maîtriser le ruissellement et l'érosion

Au début de la décennie 1990, la Tunisie s'est lancée dans un ambitieux programme de construction de 1 000 lacs collinaires dans la zone semi-aride d'ici l'an 2 000. Ces lacs sont la pièce maîtresse de la stratégie nationale en matière de conservation des eaux et des sols dont les objectifs sont de réduire les pertes en terres agricoles (estimées à 10 000 ha/an), de réduire l'envasement des barrages (25 mm³/an), d'augmenter la recharge des nappes, de mobiliser la plus grande partie possible des 500 mm³ d'eau actuellement perdus dans la mer ou dans les Sebkhass.



Photo: Jean Albergel

Mesures de l'envasement du réservoir.

450 lacs ont déjà été construits et un réseau de 26 bassins versants représentatifs du milieu semi-aride, a été équipé en 1993 pour suivre les bilans hydrologiques, la qualité de l'eau des retenues et les différents impacts des petits barrages, sur la ressource en eau, sur l'environnement et sur le niveau de vie des agriculteurs riverains. Les recherches engagées ont pour objectifs de quantifier une ressource hydrique encore mal connue et envisager sa gestion de façon rationnelle en fonction de sa variabilité, de sa qualité et des besoins de la population locale.

Ces lacs sont de très bons pièges à sédiments. Les 24 unités "lacs collinaires", bien suivies par des mesures d'envasement depuis 1993, avaient une capacité initiale totale de stockage de 2 615 000 m³, elles ont perdu 430 000 m³ sur une durée d'existence moyenne de 4,7 années. Soit une perte moyenne égale à 3,5 % de la capacité de stockage par an. Cette perte correspond à une érosion moyenne sur les bassins versants de 10,8 t/ha avec un minimum de 1,4 t/ha et un maximum de 23,1 t/ha. En extrapolant le volume moyen de vase piégée par ces 24 unités aux 1000 prévues on obtiendrait un volume de 3,8 M m³/an, soit 15% de l'envasement des grands barrages.

Mais leur colmatage rapide va à l'encontre d'un développement agricole. Implantés dans des environnements fragiles et à faibles activités économiques, ils sont perçus comme une ressource supplémentaire, rare et vitale : l'eau.

Pour pérenniser cette ressource, l'aménagement des versants devient une priorité. La nature et la densité de ces aménagements doivent concilier la réduction du transport solide sans pour autant priver le lac de ces apports en eau par ruissellement.

Les recherches montrent que le choix des sites d'implantation tout comme le dimensionnement de l'ouvrage doivent être en rapport avec des objectifs précis qu'ils soient d'ordre conservatoire ou délibérément orientés vers le développement rural. Dans le premier cas, le seul usage possible de l'eau est la mise en place d'un reboisement ou d'une plantation d'oliviers avant l'envasement du lac. Le coût de l'opportunité de l'eau

du lac collinaire doit être comparé à celui de l'eau tracée en citerne pour mettre en place la même plantation. Dans le second cas, la pérennité de la ressource doit être prioritaire. Elle pose les problèmes de responsabilité et de partage des droits et des devoirs de maintenance et d'usage de ressources naturelles renouvelables et d'une protection d'un environnement à statut collectif.

Un modèle a été mis au point pour optimiser le dimensionnement d'un lac collinaire en fonction d'une probabilité de défaillance compatible avec des risques économiques ou sociaux.

L'objectif de recharger la nappe alluviale et d'alimenter en eau les puits de surface est atteint dans 50% des cas, les années à pluviométrie favorables (année hydrologique 1995-1996). Il ne faut pas, cependant, négliger les possibilités de dégradation de la qualité des eaux. L'évaporation, forte dans ces régions, concentre les sels dans les lacs ■

Jean Albergel et Henri Camus

email : jean.albergel@orstom.intl.tn

Pour en savoir plus

Albergel J. et Rejeb N. 1997 : Les lacs collinaires en Tunisie :

Enjeux, contraintes et perspectives. Cr. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. Albergel.

Discussion pp. 101-104.

Albergel J., Claude J. 1997 : Small dams in the dry Mediterranean area : Stakes, constraints and prospects. In Water in the Mediterranean.

Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.

Albergel J., Habaieb H., El Faleh J., Rahaingomanana N. 1997 : Qualité des eaux dans les lacs tunisiens. Enjeu d'un développement durable de la petite hydraulique dans le semi-aride. In Water

resources and irrigation water management. Int. Conf. On Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region. Vol. III " Water resources and irrigation water management ". AIIA, WWC, CIHEAM/MAI-B. 22-26 Sept 1997, Bari. Pp. 55-63.

Ragab R., Austin B.N., Albergel J. 1997 : Hydrology of semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs : an overview and some preliminary results from a Tunisian catchments. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.

Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages

Le programme de recherche ECEREX (ECologie ERosion EXpérimentation) a été conçu en 1974 pour apporter des réponses de gestion aux projets d'exploitation de la forêt en Guyane française pour le développement d'une industrie papetière et pour la mise en valeur agricole, sylvicole et pastorale des surfaces déforestées. Le dispositif comprenait dix bassins versants de 1 à 1,6 hectare, avec enregistrement continu des hauteurs d'eau et prélèvements réguliers d'échantillons d'eau, et dix parcelles de 100 à 400 m² avec mesures journalières des volumes écoulés et des transports solides. Les bassins versants ont été observés sous forêt naturelle pendant deux saisons des pluies, puis différents modes d'exploitation et d'utilisation du sol ont été appliqués sur huit bassins versants.

Le climat de la Guyane française est de type équatorial de transition. Sur le site d'ECEREX, la pluie moyenne interannuelle est de 3 250 mm, le mois le plus arrosé (mai) pouvant atteindre 600 à 1 000 mm. Le modelé est localement constitué de petites collines culminant à environ 100 mètres d'altitude, avec des reliefs en dent de peigne ou en amande. Les pentes des versants varient entre 17 et 35%. Celles des thalwegs oscillent entre 10 et 20%. Les sols, issus de schistes, sont à perméabilité élevée (drainage vertical profond) ou à perméabilité limitée en profondeur (drainage vertical bloqué).

Sur les bassins versants à drainage vertical profond, le coefficient d'écoulement annuel est de 6%, alors qu'il atteint 35 % sur sols à drainage vertical bloqué. Les débits maximums instantanés suivent la même tendance. Ils peuvent atteindre 290 litres par seconde et par hectare (l/s/ha) sur les bassins versants à drainage vertical bloqué. Ils sont restés inférieurs à 100 l/s/ha sur les sols à drainage vertical profond. Les transports solides en suspension (30 à 500 kg/ha/an) sont en bonne corrélation avec le ruissellement. Sous forêt naturelle, les charriages, essentiellement constitués de sables, sont extrêmement faibles (10 et 50 kg/ha/an). Les résultats sur parcelles sont très comparables à ceux obtenus à l'échelle des petits bassins versants.

L'année qui suit le défrichement, les écoulements augmentent de 66 à 200 % et les débits de pointe de 17 à 166 %. Trois à six ans après, ils ne sont plus significativement différents de ceux du milieu naturel. Au cours de la saison pluvieuse qui suit le défrichement mécanisé, les transports solides en suspension, avec des valeurs comprises entre 2 000 et 8 000 kg/ha/an, sont 20 à 30 fois supérieurs à ceux du domaine forestier naturel. Quant aux charriages, leurs accroissements ont été multipliés par des facteurs de 50 à 500,

Pour en savoir plus

Fritsch J.M. et Sarrailh J.M., 1986. Les transports solides dans l'écosystème forestier guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages. Cahiers Orstom, série pédologie, Vol. XXII, n°2, 1986.
Fritsch J.M., 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECE-REX en Guyane française. Thèse de l'Université Montpellier II, Editions de l'Orstom,

Coll. Etudes et Thèses, Paris, 392 p.

Roche M.A., 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ECEREX, en Guyane. Cahiers Orstom, série hydrologie, Vol. XIX, n°2 : 81-114.

Sarrailh J.M., 1984. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECE-REX : résumé des premiers résultats. Bois et Forêts des Tropiques, n°206, 4ème trimestre 1984 : 13-32.

atteignant des valeurs comprises entre 6 000 et 13 000 kg/ha/an. Cependant, les remaniements le long des versants des bassins défrichés ont été sans commune mesure avec les transports solides effectivement exportés hors des bassins. Mesurés par des levés topographiques sur un des bassins versants, ceux-ci correspondent à une ablation moyenne de 84 mm soit à une masse de 1 200 tonnes par hectare.

Sous prairies artificielles, les écoulements sont restés supérieurs de 27% aux écoulements sous forêt primaire et les débits de pointe de 76%, alors que les transports solides ont été compris entre 106 et 540 kg/ha/an, soit 2,4 à 3,2 fois supérieurs à ceux du milieu naturel. Ces valeurs sont-elles compatibles avec une conservation à long terme des sols guyanais, compte tenu de la vitesse des processus de pédogenèse ? Il est encore difficile de répondre à cette question, d'autant que la façon dont les défrichements sont réalisés conditionne très largement l'avenir de ces aménagements ■

Jean-Marie Fritsch, Orstom
et Jean-Michel Sarrailh, forestier CTFT

email : j-marie.fritsch@mpl.orstom.fr

Pâturage implanté après défrichement de la forêt primaire.

Brûlis après défrichement mécanisé.



Déboisement par tracteur à chenilles.

La maîtrise de l'érosion et du ruissellement dans le Nordeste sec du Brésil

Parcelles de mesure de l'érosion sous diverses cultures (Alagoinha, Paraíba).

En raison des conditions adverses du climat et de l'extension des sols peu épais et caillouteux dès la surface, le Nordeste semi-aride du Brésil est considéré comme une région soumise à une érosion hydrique importante. Fondées sur des observations partielles, les clameurs répétées des écologistes ont renforcé ce sentiment de dégradation alarmiste. Ces clameurs ont amené les responsables de la SUDENE, Surintendance de Développement du Nordeste, organisme fédéral, à financer des études visant à analyser les facteurs érosifs et à en mesurer et si possible à en réduire les effets. Une convention chargée de dresser un bilan des études de conservation et d'établir un diagnostic de la situation est signée avec l'Orstom et débute en 1980. Le travail réalisé et les études et synthèses qui ont suivies autorisent à établir un bilan bien plus optimiste et nuancé du danger, des manifestations érosives et des moyens de lutte.

Près de vingt millions de ruraux tirent leur subsistance du million de km² qui compose le Nordeste semi-aride ou "Sertão". La pluviométrie moyenne annuelle se situe entre 400 et 800 mm et sa variabilité est l'une des plus élevées au monde. Les autres facteurs climatiques, dont l'agressivité des pluies, sont plus cléments que ceux d'autres régions sèches comme le Sahel africain par exemple. La "caatinga", végétation du type bush arboré et arbustif est le plus souvent dense, bien conservé et à potentiel de régénération élevé. Les sols développés sur les roches du socle cristallin sont peu épais et chimiquement riches. Ceux issus des couvertures sédimentaires sont épais et pauvres chimiquement.

LES MESURES DE PERTES EN TERRE ET EN EAU

Les moyennes des mesures disponibles sur parcelles et microbassins fournissent, en fonction des situations, les valeurs suivantes. Sous végétation naturelle, le couvert végétal intercepte entre 15 et 20% de la pluie annuelle et ne rend possible, quelque soit le sol, que des taux de ruissellement et d'érosion très faibles (respectivement inférieurs à 5% de la pluie et à 0,1 t/ha/an), voire nuls. Les pâturages, qu'ils soient naturels et extensifs ou cultivés, ne provoquent que des pertes en terre faibles (moyenne de 0,25 t/ha/an) mais un ruissellement de 10 à 15%. Sous les principales cultures (maïs, haricot, coton, manioc), la moyenne annuelle des pertes en terre et en eau se situe respectivement autour de 4 t et de 10%. C'est sur sol nu et travaillé que ces pertes sont les plus élevées



Photo : Jean-Claude Leprun

Pour en savoir plus

**Leprun, J. C. ,
Silveira, C.O. da.**
(1992). Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides, le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nord-est du Brésil. In : l'aridité : une contrainte au développement. Coll. didactiques Orstom, Paris,

pp. 131-151.
Leprun, J. C. (1994). Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols. Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. Etude et gestion des sols. n° 1, 1994 : 45-66.

(respectivement 10 t et 30 %). Les pertes les plus importantes concernent les sols lourds, certaines cultures (coton, manioc) réalisées sur des pentes supérieures à 5-10% après labour mécanique, billons et semis dans le sens de la pente. Le simple fait de réaliser le travail du sol et le semis perpendiculairement à la pente permet de réduire de plus de 50% l'érosion solide et de 10 à 30% le ruissellement dans le cas d'une culture peu couvrante (coton par ex.). La pratique des billons isohypses cloisonnés éliminent pratiquement les pertes en terre et en eau dans la plupart des cas.

Toutes ces données apportent la preuve que le danger érosif n'est réel que sur sol nu et travaillé (début de culture et moment des semis) dans des conditions de terrain et de cultures non appropriées. Les solutions simples et bon marché existent pour stopper l'érosion et permettre à toute l'eau de pluie de s'infiltrer. Le gain de 20% de la pluviométrie annuelle des années "normales", soit environ 100 mm peut assurer le succès de la récolte sans irrigation complémentaire ■

Jean-Claude Leprun,
pédologue Orstom

email : leprun@mpl.orstom.fr



Sol brun non calcique
(Sumé, Paraíba).

Nouvelles stratégies de lutte antiérosive

Etude de l'érosion et de la conservation des sols cultivés dans les Andes d'Equateur

Flanquée contre la côte pacifique de l'Amérique latine, la cordillère des Andes est une des barrières montagneuses les plus imposantes de la planète. Un segment important de la chaîne, d'une longueur de 5 000 km environ, se trouve en zone tropicale et traverse l'Equateur où l'Orstom, en coopération avec le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage, a mené, de 1986 à 1992, un programme de lutte contre l'érosion des sols cultivés.

Si autrefois les sociétés anciennes, notamment les Incas à partir du XIII^e siècle, ont su développer un type d'agriculture adapté aux pentes andines, la situation est différente aujourd'hui et se caractérise par une accélération de l'érosion des sols cultivés. La fragilité intrinsèque du milieu montagnard aux agents atmosphériques, associée à l'histoire du pays marquée profondément par la conquête espagnole et ses héritages récents, expliquent en grande partie cette situation. C'est ainsi, qu'au cours des 30 dernières années, le développement d'une petite agriculture d'autosubsistance ("minifundio") a provoqué la transformation des versants de la cordillère en un damier, à mailles serrées, de petites parcelles de cultures. Cette agriculture se caractérise par une production agricole essentiellement maïsicole en bas de versant et tournée vers la rotation orge-fève-pomme de terre au-dessus de 3 000/3 200m ; des terroirs cultivés sur des pentes fortes, entre 25 et 100% et non aménagés et des sols qui montrent localement un état de dégradation déjà avancé. La carte de l'érosion réalisée par l'équipe franco-équatorienne a permis de confirmer ce diagnostic en soulignant l'importance spatiale des manifestations érosives dans le minifundio et l'action prédominante des dynamiques liées à l'énergie du ruissellement. Des observations sur des parcelles de ruissellement, couplées avec des campagnes de simulations de pluie, ont montré en complément l'intensité des processus en situation de culture traditionnelle (pertes élevées en terre de 50 à plus de 100 t/ha/an et moyenne en eau, inférieure à 20%), notamment sur les andosols fragilisés par la culture, ainsi que le rôle de la pente et du taux d'argile dans la résistance des sols à l'érosion. D'autre part, ce programme a permis de mettre en place un volet appliqué à la lutte antiérosive. Dans un pre-

mier temps et conjointement avec les paysans, des aménagements simples de dissipation du ruissellement, disposés au travers de la pente et construits avec des matériaux locaux, ont été testés sur des parcelles de ruissellement améliorées de 1 000m² de surface. Après 5 années d'observations et compte tenu des bons résultats enregistrés - pertes en terre <5t/ha/an et en eau <5%), coûts peu élevés des aménagements (<1000 frs/an/ha) et augmentation des rendements - une opération de lutte antiérosive en vraie grandeur a été lancée dans un second temps. Une trentaine de familles de la région de Mojanda a pu ainsi, grâce à l'octroi d'un crédit à faible taux remboursable annuellement, améliorer la productivité de leurs terres tout en luttant efficacement contre l'érosion. En définitive, ce programme a permis de montrer, grâce à une action concertée entre plusieurs acteurs (paysans, chercheurs et Etat) et malgré l'influence des contraintes naturelles et sociales que la lutte antiérosive n'est pas un défi impossible ■

Georges De Noni, Marc Viennot, J. Asseline,
Orstom Montpellier
G. Trujillo
Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, Quito,
Equateur

email : denoni@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

De Noni G., Trujillo G., Viennot M., 1986 - L'érosion et la conservation des sols en Equateur, Cah. Orstom, sér. pédol., vol. XXII, n° 2, p. 235-245.
De Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1990 - Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur, cah. Orstom, sér.

Pédologie, vol. XXV, n° 1-2, Paris, p.183-196.
De Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1993 - Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquences sur la durabilité des agrosystèmes andins, cah. Orstom, sér. Pédologie, vol. XXVIII, n° 2, Paris, p. 277-289.

Le minifundio a tracé sur les fortes pentes andines un damier de parcelles de cultures, à mailles serrées et très exposées à l'érosion des sols.



Les sols volcaniques (andosols), fragilisés par la mise en culture, deviennent très sensibles à l'érosion linéaire.

Station de mesures de l'érosion installée chez le paysan, ce dernier participant au suivi des résultats et à la définition des travaux (Riobamba, 3 600 m).

Efficacité du paillage léger et des haies vives pour lutter contre le ruissellement et l'érosion sur les versants raides cultivés au Cap-Vert

Ce programme de recherche financé par le ministère de la Coopération et le FIDA a été initié en 1993 avec la collaboration de l'INIDA, le CIRAD-CA et l'Orstom. Il vise à fournir des éléments de décision pour une meilleure gestion agricole de l'eau en réduisant le ruissellement de surface et améliorant l'infiltration des eaux de pluie pour l'alimentation hydrique des plantes. Il se propose de quantifier le rôle du ruissellement dans les processus de dégradation du milieu cultivé, puis d'analyser les performances d'un paillage léger de résidus de culture à raison de 1500 kg MS/ha et/ou de la haie vive sur le ruissellement, l'érosion et la production de phytomasse dans la région de Godim sur l'île de Santiago.

Un dispositif en milieu réel combinant plusieurs échelles spatiales et temporelles d'observation emboîtées de la surface élémentaire à la parcelle de culture, permet d'appréhender la variabilité du milieu et d'étudier, en mode synchrone ou diachronique, le long de la toposéquence d'un versant représentatif des régosols et sols isohumiques de fortes pentes (entre 20 et 50%), les flux hydriques, érosifs et de biomasse.

Les résultats montrent que les sols présentent une assez bonne capacité d'infiltration. Celle-ci s'améliore nettement lorsque la pente augmente. Les différentes conditions de genèse du ruissellement rencontrées s'expliquent autant par l'état d'humectation préalable des sols que par la variabilité spatiale des états de surface. L'évolution du couvert végétal influence peu l'aptitude du sol au ruissellement. Sur les régosols de forte pente, à l'échelle de la parcelle, on observe que le ruissellement linéaire est dominant.

D'autre part et malgré une agressivité des pluies calculée supérieure à celles observées dans la région du Sahel, les sols sont peu érodibles et les pertes en terre observées diffèrent peu de celles obtenues dans d'autres pays sahéliens.

Enfin et bien qu'une faible quantité de résidus ait été utilisée, la technique du paillage permet une réduction importante du ruissellement et de l'érosion. Cette réduction varie suivant le type de sol. Elle est maximale lorsque cette technique est associée avec celle de la haie vive. Le paillage entraîne un meilleur stockage des eaux pluviales dans le sol mais ce supplément d'eau disponible n'est pas pleinement valorisé. Une forte présence de mauvaises herbes peut réduire cet avantage pour la production de grain. Néanmoins, la technique du paillage associée à celle de la haie vive donne les rendements en phytomasse totale les plus élevés.

Cette étude permet de conclure que c'est d'abord sur les zones à faible pente qu'il faut améliorer l'infiltration (cloisonnement, travail plus grossier et profond du sol, matière organique/mulch, reforestation) et sur

les versants raides qu'il faut briser l'énergie du ruissellement. Elle a également mis en évidence l'intérêt du paillage à faible dose sur les paramètres hydrologiques et de production de phytomasse, mais a montré les limites de son utilisation dans les zones semi-arides. Pour être adoptée, cette technique doit d'abord être raisonnée en fonction des critères pédo-climatiques et s'adapter aux conditions socio-économiques et aux stratégies des producteurs.

Le référentiel technique demande à être approfondi dans certains domaines comme la relation entre le niveau de résidus utilisés et ses effets sur le ruissellement et l'érosion. De même les domaines de la dynamique de l'eau sur les micro-bassins versants (km²) et sur l'évolution de la fertilité des sols doivent être explorés ■

B. Smolikowski, J.M. Lopez, M. Querbes, A. Querido, E. Roose et P. Perez

email : roose@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Smolikowski B. 1997. Gestion de l'eau en milieu cultivé sahélien de montagne (Cap-Vert). Conséquences sur le ruissellement, l'érosion et la phytomasse. Thèse Univ. Toulouse III. 265 p.
Barry O, Smolikowski B., Roose E., 1995. - Un projet de développement innovant au Cap-Vert : le PRODAP. Agriculture et Développement, 5 : 57-68.
Smolikowski B.,

Roose E., Lopez J., Querbes M., Querido A., Barry O., Perez P., 1998. - Utilisation du paillage et des haies vives en zone semi-aride de montagne au Cap-Vert. Sécheresse, 9, 1 : 13-21.
Roose E., Smolikowski B., 1997. Comparaison de trois tests de mesure de l'infiltration au champ sur fortes pentes (Cap-Vert). Bull. Réseau Erosion n°17 : 282-296.



Vallée de Godim dans l'île de Santiago au Cap-Vert. Test au simulateur de pluie de l'effet paillage sur le ruissellement.

Vue générale de la vallée de Godim où ont eu lieu les aménagements de lutte antiérosive.

Aménagement de parcelles paysannes.



Les techniques d'aménagement des terres sahéliennes : que penser des cordons pierreux et du labour ?

En zone sahélienne du Burkina Faso, dans la province du Yatenga, sous une pluie moyenne interannuelle de 550 mm, des études agronomiques et hydrologiques ont été combinées sur trois parcelles contiguës (2500 m²) afin d'analyser le comportement de cultures paysannes de petit mil en semis direct, sur sols sableux fins de pente faible (2,5%). Une parcelle sert de témoin. Les deux autres parcelles sont aménagées avec des cordons pierreux isohypses espacés de 20 m. L'une est labourée avant semis.

Le labour et le sarclage permettent une infiltration optimale des pluies et des ruissellements qui entrent dans les parcelles cultivées. Mais au-delà d'un cumul pluviométrique de 100 mm après travail du sol, cet effet est supprimé par aplanissement du microrelief et formation de croûtes superficielles peu perméables. En revanche, labour et sarclage fragilisent le sol, accroissant fortement le risque d'érosion lorsque le ruissellement se concentre dans des chenaux. Les labours améliorent l'enracinement du mil et les conditions d'alimentation minérale. En année favorable, ils augmentent ainsi la production de matière sèche (+50% sur 2,5 t/ha) et la production en grain (+100% sur 4 qx/ha). Mais en année très sèche, ils accroissent les risques de pertes en grains, les couverts végétaux bien développés surexploitant la faible réserve hydrique des sols.

Les aménagements linéaires en courbes de niveau (isohypses) peuvent être réalisés en matériaux divers. La résistance d'un cordon pierreux à l'effritement, et son colmatage deux à trois ans après son installation, lui permettent de jouer durablement son rôle de piège à eau et à sédiments, au contraire d'une simple diguette en terre, facilement cisailée par les déversements.

Un aménagement en cordons pierreux isohypses modifie les paramètres d'une crue par écrêtage et décalage de la montée. Cet effet n'améliore que marginalement l'infiltration qui dépend surtout de la rétention d'eau en amont des cordons pierreux. Le gain d'infiltration n'a été que de 2% au cours des trois premières années, avant colmatage des cordons. Il fut ensuite de 15%. Ce gain d'infiltration est mal réparti sur les parcelles, tant dans le sens de la pente, à cause des cuvettes de rétention en amont des cordons, que le long des cordons pierreux à cause des écoulements latéraux. Pour remédier à ces défauts, il faut multiplier les cordons et cloisonner l'aire de rétention, sarcler en buttes et non à plat. Lors de deux années assez favorables, l'amélioration de l'infiltration a permis une meilleure installation du peuplement de mil, une meilleure croissance, une meilleure fructification et un rendement amélioré (+30% sur 3 qx/ha). En revanche, les autres années n'ont pas permis de valoriser l'aménagement

Pour en savoir plus

Lamachère J.M., 1991. Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991. IAHS Publ. n°199, 109-119.

Lamachère J.M. et Serpantié G., 1991. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi. In Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. Scient. A. Kergreis et J. Claude, AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext, Paris, 165-178.

Serpantié G. and Lamachère J.M., 1992. Contour stone bunds for water harvesting on cultivated land in the north Yatenga region of Burkina Faso. In Erosion, conservation and small-scale farming, edited by Hans

Hurni and Kebede Tato (6th International Soil Conservation Conference held in Ethiopia and Kenya, 6-18 November 1989), 459-469.

Lamachère J.M. et Serpantié G. (à paraître). Valorisation agricole des eaux de ruissellement sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi. In Les journées scientifiques de l'INRGREF, Sousse, Tunisie, 25, 26 et 27 mars 1997. 18 p.



A Bidi, au Burkina Faso. Le risque de sécheresse précoce a entraîné une baisse de rendements en grains plus forte encore avec les cordons pierreux parce que la biomasse a augmenté.



Ruissellement après fermeture de la porosité superficielle du sol

pour des raisons inhérentes aux aléas sahéliens : ravages de sautériaux et de borers, excès d'eau ou grave sécheresse. L'aménagement n'a donc été un atout pour l'agriculteur qu'une année sur trois pendant la période d'essais (1985-90). Il a cependant réduit très fortement l'érosion. Les pertes en terre ont été en effet de 1,9 t/ha/an sur la parcelle témoin, 0,9 t/ha/an sur la parcelle aménagée et labourée, et 0,5 t/ha/an sur la parcelle aménagée sans labour ■

Jean-Marie Lamachère et Georges Serpantié

email : lamacher@mpl.orstom.fr

Les montagnes méditerranéennes d'Algérie

IMPACT DE L'INTENSIFICATION DE L'AGRICULTURE DE MONTAGNE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LES REVENUS

Depuis le début du siècle, les montagnes méditerranéennes du Nord de l'Algérie sont soumises à une sévère dégradation de la couverture végétale, au ravinement des sols, aux débordements des oueds et à l'envasement accéléré des barrages.

Pour protéger les terres et réduire l'envasement, les Eaux et Forêts ont imposé une stratégie musclée de défense et restauration des sols, qui tient du mariage de la restauration des terrains en montagne et reforestation de 800 000 ha de terres épuisées dans les hautes vallées et correction de km de ravines près des barrages et de la conservation de l'eau et des sols (terrassement de 350 000 ha de terres cultivées). Cependant, en 1980, l'échec de cette approche technocratique était patent : malgré 40 ans de défense et restauration des sols et des moyens considérables, l'érosion des terres et l'envasement des barrages continuent tandis que les paysans n'entretiennent pas les aménagements.

L'aménagement de ce verger en bandes enherbées et l'introduction d'une culture associée (blé/fèves) ont réduit les pertes en eau et en terre du champ et amélioré le couvert végétal en saison pluvieuse, ainsi que les revenus nets des paysans. Cette stratégie de gestion du milieu montagnard est beaucoup mieux acceptée que les terrassements imposés par le pouvoir central.

Sur ce versant surpâturé marneux de Souagui, le ruissellement lors de pluies abondantes de l'hiver et du printemps a creusé une série de ravines parallèles. Les transports de sédiments (100 à 300 t/ha/an) lors des plus grosses averses de l'année, correspondent à l'arrachement des altérites formés chaque année (15 mm) sur les versants en V.

En 1985, l'INRF et l'Orstom ont uni les efforts d'une douzaine de chercheurs pour tester une nouvelle approche participative visant à valoriser la terre et le travail, tout en réduisant les risques d'érosion. Il s'agit d'intensifier les systèmes de culture régionaux pour protéger la surface du sol contre l'énergie des pluies et du ruissellement.

L'analyse de l'efficacité des aménagements mis en place de 1945 à 1985 (350 000 ha) a montré qu'une partie des banquettes (~20%) a disparu, effacées par les paysans inquiets de voir l'Administration prendre position sur leurs terres ancestrales, plus de 50 % sont en mauvais état n'ayant pas été entretenus et sur le reste en bon état, il n'est pas prouvé que l'érosion soit un problème majeur !

Sur le réseau de 50 parcelles d'érosion installées en trois zones (Tlemcen, Mascara, Médéa) et qui couvre la variabilité des sols, des pentes fortes et des systèmes de production, on a montré que l'érosion en nappe sur les champs est faible (0.1 à 1.5 mm), beaucoup plus faible qu'en Afrique tropicale. Par contre, le ruissellement lors des grosses averses tombant sur sol nu, tassé ou engorgé, peut atteindre 30 à 80% des pluies et causer en aval une série de dommages. Les sols sont généralement résistants à la bat-



tance des pluies du fait des fortes teneurs en argile saturée en calcium et des cailloux, mais sensibles au ravinement.

L'intensification des systèmes de production (fertilisation équilibrée, semences sélectionnées, soins phytosanitaires, travail adapté du sol) a régulièrement réduit les risques de ruissellement et d'érosion. Elle a surtout permis d'augmenter très substantiellement la production de céréale (de 8 à 50 quintaux/ha/an), de paille (de 2 à 22 q/ha/an) et de divers résidus végétaux de telle sorte que l'élevage (et la production de fumier) peut aussi en profiter. Quant aux revenus nets, ils sont passés de 250 \$ (blé extensif+jachère pâturée) à 2 400 \$ pour le blé en rotation avec des légumineuses, 2 500 \$ pour la vigne et vergers extensifs et jusqu'à 3 000 à 5 100 \$ pour la vigne ou verger avec culture intercalaire de légumineuses l'hiver.

Par contre l'érosion en ravine est très forte : elle atteint 20 à 30 mm/an en moyenne et concerne des milliers de m³ lors des pluies décennales. Les glissements de terrain ne se manifestent que lors de ces averses exceptionnelles sur sol engorgé ou sur versant déséquilibré par le ravinement ou les oueds. Avec la dégradation des berges, ce sont les sources principales des sédiments qui envasent les précieux barrages.

Le projet a réussi à réduire le coût des aménagements mécaniques des ravines de 75% en remplaçant les gabions par des seuils légers en grillage tendu (maille < 1cm) sur fer cornière. Il suffit de 2 à 5 averses pour remplir les seuils de sédiments : il faut alors monter un 2ème étage de seuils pour bloquer les sédiments de fond, et remonter le fond de ravine jusqu'à ce que les versants atteignent leur pente d'équilibre : alors la végétation se réinstalle naturellement. Un autre volet du projet a étudié le développement d'une vingtaine d'arbres et arbustes en amont, autour et dans la ravine, transformée progressivement en "oasis linéaire", véritable jardin botanique où les peupliers, les frênes, les fruitiers et les eucalyptus se sont développés admirablement. L'objectif est de restituer la ravine à son ancien propriétaire après signature d'un contrat où le paysan s'engage à entretenir les aménagements contre le droit d'exploiter les fourrages, les fruits et le bois d'œuvre ■

Eric Roose*, Mourad Arabi, Rachid Chebbani, Mohammed Mazour et Boutkil Morsli**

email : roose@mpl.orstom.fr

* LCSC, Orstom, BP 5045, F 34032 Montpellier, France.

** INRF, BP 37 Cheraga, Alger, Algérie.

Après fixation du fond de ravine par divers types de seuils, les versants tendent vers la pente d'équilibre et se revégétalisent naturellement. La ravine stabilisée fonctionne comme une "oasis linéaire", havre de verdure dans ce milieu particulièrement aride en été.



Influences du système de culture sur les risques érosifs et la production intensive de coton et maïs en savane humide du Nord-Cameroun

Une enquête sur les blocs de culture intensive coton/maïs de la région Sud-Est Bénoué dans le Nord-Cameroun, a montré que les sols sont profondément dégradés au bout de 12 à 15 années pour les terres sableuses, un peu plus pour les sols plus argileux en surface. Le diagnostic fait ressortir un déséquilibre des bilans organiques et minéraux, entraînant la formation d'un horizon sableux déstructuré, la perte d'activité de la mésofaune, la croissance du ruissellement et de l'érosion, l'irrégularité de la densité des semis et la perte de production au point d'amener les autorités à interdire la culture cotonnière sur ces terres dégradées (non rentable). Tant que les terres étaient abondantes, la solution consistait à transporter le village et les cultures sur d'autres terres. Mais actuellement, des investissements communautaires (forage, routes, bâtiments en béton, église) et la pression démographique ne permettent plus cette migration. Il faut donc mettre au point d'autres systèmes de production intensifs mais plus durables.

Grâce au projet Garoua II, (financé par la coopération française), la plus grande station d'Afrique d'expérimentation sur l'érosion (57 parcelles d'érosion et 4 ha d'expérimentations agro-pédologiques) et la restauration des sols a été mise en place à Mbissiri, près de Tcholliré, sur des sols sableux les plus sensibles pour mesurer le ruissellement, l'érosion, les rendements des cultures, les bilans des pertes et l'évolution du sol en fonction d'une douzaine d'itinéraires techniques et de quatre modes de gestion des matières organiques (exportation ou enfouissement des résidus de culture, paillage ou apport de fumier).

RÉSULTATS AU TERME DES QUATRE PREMIÈRES ANNÉES

Les systèmes conventionnels comportant un labour, deux sarclages, un buttage mécanique et la fumure minérale vulgarisée donnent de bons rendements durant 4 années (2 t/ha de coton graine et >5 tonnes de maïs/ha/an). Ceci ne peut être durable car,

**Envahissement
du réseau hydraulique
par les sables érodés sur
les versants. L'enracine-
ment d'eucalyptus fixe
les berges.**

**Maïs labouré,
sarclé, butté, technique
conventionnelle.**



**Dispositif de mesures
du ruissellement et de
l'érosion. A l'avant-plan
bandes enherbées.
Station IRAD de Mbissiri
au Nord-Cameroun.**

malgré des pentes < 2.5%, le ruissellement atteint 25 à 35 % des pluies annuelles, >80 % des plus fortes averses et l'érosion dépasse 25 à 35 t/ha/an dont 5 à 12 tonnes de MO+argile+ limons, qui constituent les éléments les plus fertiles du sol.

Les systèmes " semis direct dans la litière avec travail du sol réduit à la ligne de plantation ", gardant le sol partiellement couvert toute l'année, ont manifesté beaucoup moins de ruissellement (5 à 15%) et d'érosion (1 à 3 t/ha/an, dont <500 kg de suspensions fines) : les rendements peuvent être satisfaisants pour le coton (= à + 20%) ou insuffisants pour le maïs en année très humide (-10 à -30% du labour) car l'enracinement est moins développé durant cette 1ère phase et le maïs a souffert du lessivage plus abondant de l'azote ou d'un manque temporaire d'oxygène (moins de ruissellement entraîne plus de drainage).

L'apport de matière organique enfouie n'a guère amélioré ni l'infiltration, ni la résistance à l'érosion, ni les rendements à court terme. Par contre le paillage en surface a réduit nettement les risques érosifs et l'apport de 3t/ha/an de fumier de chèvre a toujours donné les meilleurs rendements.

Sur les sols sableux dégradés par 30 années de culture, la restauration de la capacité de production fut remarquable. Le travail initial profond du sol, la fumure organique et minérale ou une courte jachère de légumineuse (*Calopogonium pruriens*) ont permis après deux années de retrouver des rendements tout à fait satisfaisants : > de 2 t/ha de coton graine et >5 t/ha/an de maïs grain.

L'effet immédiat de l'érosion sur les rendements s'est manifesté par la disparition des graines germées (arrachées ou enfouies sous des nappes de sable stérile), une perte de 10% de la densité et une perte de fumier, réduisant de plus de 25% les bénéfices qu'on pouvait en attendre.

RÉSULTATS À LONG TERME : ARRIÈRES EFFETS DE L'ÉROSION SUR LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS

Le décapage de 0-5-7-10-12 ou 15 cm de sol sur 30 parcelles de 50 m² a montré une baisse rapide de 30% des rendements de maïs (labour + fumure minérale conventionnelle) pour les 50 premiers mm et 50 % pour le décapage de 150 mm de sol humifère. Les horizons humifères superficiels sont donc plus stratégiques pour la conservation de la production des cultures.

Après quatre années d'érosion en nappe sélective des particules fines et fertiles, nous disposons d'un jeu de 50 parcelles ayant perdu 2 à 100 tonnes/ha/4 ans de terre humifère sur lesquelles on a semé du maïs avec le même système de préparation du sol. La comparaison des parcelles à antécédant " systèmes labour conventionnel " et " semis direct sous litière avec travail réduit " a montré que la perte de 5 mm supplémentaire de sol (groupe labour) a réduit le rendement de 30% de maïs.



L'érosion en nappe sélective des particules fines et fertiles est donc dix fois plus rapide que le simple décapage par l'érosion en masse ou rigole (non sélective). Il faut donc mettre au point des systèmes de production protégeant la surface de la battance des pluies, dès le défrichement sans attendre que s'installe l'érosion en rigoles et ravines, plus spectaculaire.

Il faudrait aussi exprimer la tolérance à l'érosion pas seulement en tonnes de terre perdue par hectare et par an (1 à 12 t/ha/an soit 1 mm), mais tenir compte de la fertilité de ces sédiments fins ■

Zachée Boli*, Eric Roose**
et Pascal Zahonero**

email : roose@mpl.orstom.fr

* IRAD, Yaoundé, Cameroun,

** Orstom, LCSC, BP.5045, F34032 Montpellier, France.

Pour en savoir plus

Boli Z., Roose E., Bep A Ziem B., Sanou K., Waechter F., 1996. - Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux sableux tropical. Recherche de systèmes intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun. Cahier Orstom Pédol., 28, 2 : 309-326
Boli Z., Roose E., Bep B., Sanou K.,

Waechter F., Zahonero P., Wahoung A., 1998. Effets de pratiques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur sol ferrugineux en zone soudanienne humide du Nord - Cameroun. In "Agricultures des savanes du Nord-Cameroun" Garoua, Cameroun. CIRAD-CA, Montpellier, 255-273.

La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols au Rwanda

En Afrique, la population fuyant les maladies tropicales et la sécheresse des plaines (10 à 40 habitants par km²) se concentre sur les montagnes et développe des systèmes agroforestiers intensifs qui permettent souvent des populations de plus de 700 hab./km². Le Rwanda, comme les zones montagneuses du Cameroun, Burundi, Ethiopie, Tanzanie et Kenya, connaît depuis une trentaine d'années une phase active d'érosion due à une forte pression démographique qui pousse les paysans à cultiver sans relâche des pentes toujours plus raides et des terres épuisées. En 1993, plus de 50% des familles vivaient de l'exploitation intensive du bois, des fourrages et des cultures vivrières sur moins d'un hectare. Selon les collines, la densité dépassait 200 à 800 hab./km². Cependant, la production ne cesse de diminuer vu la disparition des jachères, les faibles restitutions minérales et l'hémorragie des nutriments par les eaux de ruissellement et de drainage. Cet appauvrissement extrême des populations explique en partie les massacres de ces dernières années dans la région des Grands Lacs.



L'efficacité des haies vives de légumineuses arbustives a été testée sur 7 parcelles d'érosion de 100 m² isolées par des tôles et terminées à l'aval par un canal de réception du ruissellement et deux cuves de stockage reliées par un partiteur à 11 fentes. Station Isar de Rubona.

LA LUTTE ANTIÉROSIVE

Durant la période coloniale, trois techniques furent largement diffusées : les fossés d'absorption totale (travaux d'installation >250 jours/ha), les haies herbacées sur les pentes de plus de 20% (50 j/ha) et le paillage épais sous les caféiers (200 j/ha). A l'indépendance, beaucoup de ces aménagements furent abandonnés : trop de travail d'entretien et peu d'amélioration des rendements. Mais depuis, les dégâts de l'érosion n'ont fait qu'empirer.



Les terrasses radicales sont stériles sur la moitié amont où affleurent la roche ou l'altérite acide. On distingue des fissures à la ligne de partage entre le sol en place et l'altérite peu perméable.



Sur les collines, les cultures s'organisent en lanières de plus en plus étroites et allongées à mesure que les générations se succèdent : le risque d'érosion linéaire augmente et menace de détruire le réseau de pistes. Noter le double rideau d'eucalyptus qui stabilise l'assise de la piste de montagne contre les glissements de masse.

En 1988-93, une nouvelle approche a été testée qui vise à arrêter l'hémorragie d'eau et de nutriments par des haies vives de légumineuses arbustives, à introduire une fumure organique, et finalement à tester une fumure organique complétée par un engrais minéral adapté aux besoins des cultures.

LES RÉSULTATS SUR ONZE PARCELLES DE 100 M² DE 23% DE PENTE SUR SOL FERRALLITIQUE ACIDE

Sur les quatre parcelles de comportement, les méthodes conventionnelles des fossés d'absorption totale, des terrasses radicales (1 000 j/ha) et des terrasses progressives, l'érosion a été maîtrisée, mais les rendements n'ont cessé de décroître. Par contre en deux ans, les haies vives paillées à la base, ont réussi à maîtriser le ruissellement ($CR < 2\%$) et l'érosion ($E < 2t/ha/an$), et à ralentir la dégradation des rendements.

Les haies arbustives, tous les dix mètres, après deux années d'installation, produisent 1 à 2 t/ha/an de bois de feu et 3 à 9 t/ha/an de biomasse fraîche : moitié de fourrage riche en azote disponible en saison sèche et moitié de paillage utilisable en saison des pluies. L'ensemble de cette biomasse représente une remontée de 100 kg d'azote, 5 kg de P₂O₅ (seulement car le sol est fort carencé en P.) et 20 à 40 kg de K, Ca et Mg, selon la richesse du sol en ces éléments.

Le système traditionnel produit 800 kg/ha de

céréales (maïs et sorgho) et 500 kg de haricots, soit de quoi nourrir 5 personnes/ha cultivable, ou 250 hab/km² puisqu'il faut déduire les parcours, forêts et zones habitées.

L'apport de 10 t/ha de fumier humide a juste permis de maintenir les rendements, car les sols et les MO sont carencés en phosphore. Pour obtenir des rendements suffisants pour nourrir 800 hab/km² (29 q/ha de grains de céréales et 10 q/ha de haricots,), il a fallu chauler le sol acide (2,5 tonnes de chaux tous les 3 ans), revitaliser l'horizon humifère (3 t/ha/2ans de fumier de parc, plus les émondes des haies) et apporter un complément minéral adapté à chaque culture (N de 100 à 40 kg/ha, P₂O₅ de 30 à 100 kg/ha, K₂O DE 20 à 200 kg/ha).

Les réseaux de haies vives, de fossés ou de terrasses sont donc des moyens assez efficaces pour stabiliser les fortes pentes cultivées en montagne. Mais la conservation des sols ne suffit pas : un apport complémentaire de fumier et d'engrais minéral est indispensable pour restaurer un niveau acceptable de productivité du sol et du travail, argument indispensable pour faire accepter le travail supplémentaire exigé par la lutte antiérosive ■

Eric Roose* et François Ndayizigiyé**

email : roose@mpl.orstom.fr

* LCSC, centre Orstom, BP 5045, Montpellier F34032, France

** Station Isar de Rubona, BP. 138, Burure, Rwanda.

Les terrasses radicales ou en gradins exigent 1000 à 1500 jours de travail et la fertilisation organique et minérale complémentaire ultérieure pour restaurer leur capacité à produire. Les paysans ont rarement les moyens de faire de tels investissements.

Dans la région d'élevage du Bugarane, des haies vives ont été installées pour délimiter les paddocks, aires de pâturage. A l'avant plan, le sentier emprunté par le bétail pour rejoindre le point d'eau est profondément entaillé : c'est un problème très difficile à résoudre, car on ne peut modifier beaucoup le tracé de ces sentiers très fréquentés.



Influence du travail du sol et des apports sur le ruissellement et l'érosion : le cas des Rougiers de Camarès dans le Sud-Aveyron

Les Rougiers de Camarès sont une zone de petites montagnes et de collines au sud du Massif Central, principalement orientée vers l'élevage ovin pour la production de fromage de Roquefort. L'érosion hydrique y affecte 80% des terres. Cette sensibilité s'explique d'abord par les caractéristiques du milieu naturel : sols souvent peu épais, développés sur des roches-mères friables et des pentes marquées, soumis à un climat relativement agressif (gel, orages, sécheresse). Cette sensibilité à l'érosion résulte également des conditions d'exploitation de ce milieu, surtout depuis l'intensification agricole des dernières décennies : mécanisation, raccourcissement des rotations et travail du sol fréquent, remembrement et suppression des haies, défrichement et mise en culture de terres marginales aux sols très peu épais ou sur pentes fortes.

À la demande de la chambre d'Agriculture de l'Aveyron, une équipe de l'Orstom a réalisé des expérimentations afin d'évaluer l'influence des pratiques culturales sur la sensibilité des sols des Rougiers au ruissellement et à l'érosion. Différents types de travail du sol (labour à plat avec ou sans passage d'un rouleau lourd, labour dressé, travail superficiel, semis direct sans travail) et d'apports (fumier, engrais) ont ainsi été testés au champ, sur un sol peu évolué (régosol) limono-argilo-sableux (environ 30% d'argile, 40% de limons et 30% de sables) développé sur schiste et argilite. La sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion a été évaluée par simulation de pluie. Celle-ci consiste à produire avec un gicleur une pluie artificielle de caractéristiques proches de celles des pluies naturelles, afin de mesurer sur une microparcelle de 1 m² le ruissellement et l'érosion induits.

La simulation de pluie sur sol nu a montré que dans les parcelles labourées, surtout en cas de passage du rouleau lourd, les ruissellements sont importants et s'accompagnent de pertes en terre élevées : après 90 mn de forte pluie (60 mm/h), jusqu'à 40% de la pluie incidente a ruisselé, entraînant jusqu'à 0,5 kg de terre de la microparcelle (1 m²). Dans les parcelles en semis direct, le ruissellement et surtout l'érosion sont moins importants : environ 30% de la pluie totale a ruisselé, mais elle entraîne moins de 0,2 kg de terre. Les résultats sont variables sur les parcelles en travail superficiel. Le type d'apport, fumier ou engrais, a peu d'influence sur le ruissellement et l'érosion après un seul apport. Mais cette influence devient probable-

ment sensible après plusieurs années d'apports réguliers. En effet, plus la teneur en matière organique analysée dans l'horizon de surface d'une parcelle est élevée, moins le ruissellement et les pertes en terre sous pluie simulée sont importants dans cette parcelle. Cette relation s'explique ainsi : la matière organique s'oppose à la désagrégation du sol en petites particules facilement transportables et susceptibles de former une croûte peu perméable, elle s'oppose également à la "liquéfaction" du sol. Les pratiques qui contribuent à une teneur élevée en matière organique dans l'horizon de surface permettent donc de limiter la production de ruissellement et d'érosion par les parcelles agricoles : apports réguliers de fumier ou de résidus de culture au sol, insertion de prairies ou d'engrais vert dans l'assolement. De même, le semis direct et le travail superficiel, qui concentrent la matière organique en surface, apparaissent plus favorables que le labour, qui enfouit cette matière organique ■

B. Barthès, G. De Noni, E. Roose, J. Asseline, A. Albrecht, M. Viennot,
Laboratoire d'étude du comportement
des sols cultivés. Orstom, Montpellier

email : denoni@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Asseline J., De Noni G., Nouvelot J.F., Roose E., 1995. - Caractérisation de l'érodabilité d'une terre de moyenne montagne méditerranéenne (Sud-Aveyron, France). *Bull. Réseau Erosion*, 15 : 471-488.
Asseline J., Valentin C., 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-350.
Barthès B., Albrecht A., Asseline J.,

De Noni G., Roose E., Viennot M. - Pratiques culturales et érodabilité dans les Rougiers de Camarès (Aveyron). Soumis à Étude et gestion des Sols.
Barthès B., De Noni G., Asseline J., Viennot M., Roose E., 1998. Determining factors of erodibility in a cultivated mountain mediterranean soil (Aveyron, France). Communication au 16e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26.08. 1998.



Dans les Rougiers de Camarès (Aveyron), paysage raviné.

Tentative de fixation des ravines par des cordons pierreux.

Aménagement d'un chemin d'eau par des cordons pierreux en chicane.

Culture bananière et techniques de gestion des sols acides du Burundi

Bananiers en cultures de case fertilisées avec cendres, ordures ménagères, fumier et/ou compost.



Photo : Théodomir Rishirumuhirwa

La majorité des sols du Burundi sont issus d'une pédogénèse de type ferralitique. Ils sont acides, très désaturés, carencés en phosphore et ont un très faible potentiel de production. Parallèlement, ce pays connaît des densités de population très élevées (150 à 800 habitants au km²) et une géomorphologie très accidentée, caractérisée par des pentes moyennes à fortes (5 à 25 %, 40-80%). L'érosion hydrique y est très importante (200 à 500 t/ha/an selon la pente, la hauteur des précipitations et type de couvert végétal). C'est dans ce contexte que les agriculteurs burundais ont développé des systèmes de production basés sur la concentration et le recyclage de la matière organique sur la bananeraie et les cultures associées en cultures de cases.

Une étude sur parcelles d'érosion a été menée à la station de Mashitsi, située sur le Plateau central du Burundi, à 1 650 m d'altitude et recevant 1 100 mm de pluie par an. Les parcelles ont été aménagées sur une pente de 8%. L'étude portait sur l'incidence des bananeraies dans la gestion du ruissellement et le contrôle de l'érosion en fonction de leurs densités de plantation et de leur productivité en résidus. Les densités retenues variaient entre 666 et 1666 pieds de bananiers/ha (écartements 2x3 m, 3x3 m, 4x3 m et 5x3 m).

Dans les systèmes culturels traditionnels, la productivité des bananiers en résidus est basse et ne dépasse guère 1-2.7 tonnes de M.S./ha/an correspondant à un taux de couverture du sol de 10 à 25% selon les densités de plantation. Ces résidus ont été utilisés comme paillis soit en couronne autour des pieds de bananiers, soit en bandes isohypses de 0.5 m de largeur. Deux témoins ont été retenus : une par-

Pour en savoir plus

Rishirumuhirwa, T., 1993. - Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferralitiques du Burundi. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, n° 2, p. 367-383.

Rishirumuhirwa, T., 1996. - The contribution of banana farming systems in sustainable land use in Burundi.

ISCO conference, Bonn.

Rishirumuhirwa, T., 1997. - Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro - Burundi). Thèse n°1636, EPFL, Lausanne, 302 p.

celle nue (témoin international) et une bananeraie sous paillis complet. Pour chaque cas, on a déterminé le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram), le coefficient de ruissellement maximal observé en 24 heures sur une année (K_{rmax}) et les pertes en terres.

Les résultats obtenus montrent que le paillis complet constitue la solution idéale pour maîtriser le ruissellement (Kram et K_{rmax} < 1%) et arrêter l'érosion (moins de 100 kg/ha/an). Mais cela n'est possible que si la production de résidus atteint au moins 8 t de M.S./ha/an. Ce qui n'est pas le cas dans les systèmes traditionnels. Dans ce cas, le paillage en bandes apporte une solution satisfaisante. Il réduit le ruissellement (Kram) à 2-4% et les pertes en terres à 1.1-2.5 t/ha/an dans les conditions de Mashitsi, selon la quantité de résidus disponibles, contre 40.5 t/ha/an sur parcelle nue. Le paillage en couronne est moins efficace avec des Kram se situant entre 4.8 et 6.2% et les pertes en terres entre 13.9 et 47.7 t/ha/an contre 18% (Kram) et 73.3 t/ha/an (érosion) sur parcelle nue.

L'utilisation des résidus des bananeraies comme paillis en bandes isohypses semble donc une solution alternative au paillage complet. Cette technique doit être combinée avec d'autres méthodes de lutte anti-érosive, notamment les fossés isohypses, les cultures associées, les haies vives en courbes de niveau, etc. Cette approche intégrée permet de ramener le ruissellement et les pertes en terre en dessous des seuils de tolérances estimés à 2.5% pour le Kram et à 2.5 t/ha/an pour l'érosion en sols ferralitiques fortement désaturés ■

Théodomir Rishirumuhirwa et Eric Roose

email : roose@mpl.orstom.fr



Photo : Théodomir Rishirumuhirwa

Le Burundi, un paysage dominé par la culture du bananier.

Les aspects juridiques de la conservation des sols sont pris en compte par plusieurs sources de droits écrits et oraux comprenant respectivement le législatif et le réglementaire d'une part et les normes d'origines coutumières, les pratiques et les représentations d'autre part. Cette pluralité juridique et la diversité de ses modes d'expression nécessite une approche en anthropologie juridique de l'environnement afin de ne pas rester en dehors des réalités sociales que pénètre trop peu le droit "posé" par le législateur.

Le droit écrit a jusqu'à maintenant appréhendé le rapport à l'espace sous l'angle de l'appropriation foncière et, bien que la tentative de créer et de généraliser la propriété au moyen du titre foncier par la procédure d'immatriculation ait échoué, les Etats indépendants ont conservé dans leur législation cette logique occidentale. Dans l'Afrique rurale, la survie humaine est si dépendante de la terre et des éléments qu'elle supporte, que l'homme (chef d'exploitation, de lignage ou de fraction, etc.) ne peut concevoir de l'aliéner au risque de se mettre en péril lui et ses descendants. La terre constitue un patrimoine à transmettre dans le but d'assurer la reproduction sociale.

Depuis la colonisation, les textes de droit n'ont cessé de plaquer des conceptions étrangères sur les réalités locales. L'Etat s'est tout d'abord arrogé, au nom de la souveraineté nationale, la propriété de la terre puis la gestion de l'environnement. Pour ce faire, il s'est muni d'un régime de domanialité publique et d'un régime forestier assorti de normes coercitives, de mises en défends, de protection de périmètres, de reboisement, etc. Diligemment par le haut, cette logique est incompatible avec une gestion locale car la conservation des sols y est intégrée dans une démarche de gestion publique dans laquelle le régime est conditionné par la notion de mise en valeur. Dans ce contexte, les populations ne disposent que de droits d'usage qui ne leur offrent aucune sécurité juridique foncière en mesure de les responsabiliser. C'est pourquoi, le processus de décentralisation en cours dans de nombreux pays africains ne semble pouvoir apporter de solutions que si le système juridique actuel est repensé dans ses fondements.

Les droits fonciers endogènes issus de la coutume reposent sur une relation à l'espace qui intègre son caractère multifonctionnel et qui supporte plusieurs droits. Le rapport d'appartenance qui caractérise le système de la propriété fait place à un système d'affectation de droits reposant sur la distinction de l'espace et des ressources. On trouve donc des droits de contrôle de l'espace et des droits d'accès aux ressources qui conditionnent l'appro-

priation de celles-ci. Ainsi, pastoralisme, agriculture et foresterie peuvent-ils se conjuguer dans le temps et l'espace avec des acteurs différents. Cette imbrication de droits sur le milieu rompt avec l'esprit du Code civil français qui opte pour un droit de propriété unique du fonds, susceptible de démembrements et de dissociation des droits de jouissance. Le propriétaire dispose ainsi de façon absolue (que des lois sont obligées de contenir) de l'espace foncier en tant que contenant de droits.

Notre approche foncière environnementale part d'une lecture "de l'intérieur" des rapports fonciers et apporte des éléments juridiques contribuant à une gestion patrimoniale de l'environnement, directement liée à la conservation des sols. Elle se propose de clarifier le jeu des acteurs sociaux en organisant les droits existants et en permettant à différents centres de décision de s'exercer de façon responsable et légitime sur un même espace. Ces différents droits sont corrélés à différentes maîtrises foncières que nous avons conçues dans l'esprit de gérer les relations homme-sociétés/milieux.

Nos travaux répondent ainsi à la préoccupation des Etats de disposer d'outils juridiques opérationnels pour la conservation des sols. Celle-ci s'inscrit dans une politique de gestion environnementale où l'intervention de chaque acteur doit être contenue par des droits et au sein d'institutions ■

Olivier Barrière,

Juriste de l'environnement et anthropo-juriste, Orstom Montpellier, LEA

email : olivier.barriere@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Barrière O. et Barrière C., 1995 - Le foncier-environnement, pour une gestion viable des ressources naturelles renouvelables au Sahel ; Volume 1 : Approche interdisciplinaire dans le delta intérieur du Niger (Mali), 517 pages ; Volume 2 : Répertoire des conflits fonciers du delta intérieur du Niger (Mali), 400 pages ; Volume 3 : Index ethnobotanique des espèces du delta intérieur du Niger (Mali), 73 pages ;

Rapport de programme Orstom-Cnrs.

Barrière O. et Barrière C., 1996 - Systèmes fonciers dans le delta intérieur du Niger. De l'implosion du droit traditionnel à la recherche d'un droit propice à la sécurisation foncière in La sécurisation foncière en Afrique noire, Editeur scientifique : E. Le Roy & al, Ed. Karthala, Paris, pp.127-175.

Barrière O., 1996 - Gestion des ressources

naturelles renouvelables et conservation des écosystèmes : le foncier-environnement, Thèse, Université PARIS I Panthéon-Sorbonne, 2 vol. 686 pages & 230 pages. **Barrière O. et Barrière C., 1997** - Le foncier-environnement, fondements juridico-institutionnels pour une gestion viable des ressources naturelles renouvelables au Sahel, Ed. FAO, Col. "Etudes Législatives" n°60, Rome, 120 pages.

Semis direct et contrôle de l'érosion dans les "cerrados" du Brésil

Système conventionnel de labour avec l'érosion correspondante.

Près de 23% du territoire brésilien est occupé par l'écosystème du "cerrado", dont au moins 50 millions d'hectares sont potentiellement utilisables pour une agriculture mécanisée intensive. Toutefois, après quelques années de culture, on constate une baisse de la productivité, spécialement lorsque ces sols sont travaillés de façon inappropriée, comme avec le système conventionnel de labour par lourdes charrues à disques. La raison principale de cette chute de productivité consiste en une diminution des teneurs en matière organique et une dégradation des propriétés physiques des sols, principalement de leur état structural, qui provoque leur compactage. Ces phénomènes affectent la dynamique de l'eau et des nutriments, ainsi que le développement du système racinaire, ce qui se traduit par l'accélération des processus érosifs de ces sols.



Pour en savoir plus

Blancaneaux P., Freitas P. L. de, R.F. et Carvalho A. M. de, 1993 - Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central. Cah. Orstom, Sér. Pédol., vol. XXVIII, n°2, 1993 : 253-275.
Blancaneaux P., Da Costa L. D., 1993 - Agriculture et environnement au Brésil. Le cas des "Cerrados", savanes des hauts plateaux. In: Orstom Actualités, n°38, pp. :

19-24, 1993.
Blancaneaux P., Freitas P. L. de, Ker J. C., Carvalho Filho A. de, Motta P. E. da, Teixeira S. M., Carvalho Jr. W. de, 1997 - Avaliação, manejo e conservação de solos nos cerrados. O exemplo da microbacia piloto de Goiás, Morrinhos (Brasil). In: Congr. Bras. Ciência Solo, 26, Rio de Janeiro (RJ); Anais : Proceedings, CD-ROM.

Les programmes de recherche menés en coopération entre l'Orstom et l'Embrapa/CNPQ dans les cerrados du Brésil central sont étroitement liés aux systèmes culturaux actuels et visent à une meilleure caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces sols. L'objectif est de proposer des pratiques culturales alternatives comme solutions de conservation, visant au maintien ou à l'augmentation de la productivité des cultures, tout en réduisant au minimum les opérations de préparation du sol, de façon à éviter la pulvérisation excessive des couches superficielles.

Le semis direct sur le chaume, sans préparation du sol, qui appartient aux systèmes agroécologiques intégrés, apparaît comme un excellent moyen de contrôle de l'érosion et de conservation des sols dans les conditions climatiques adverses des cerrados. La viabilisation de cette technique, qui dépend de l'adoption de technologies alternatives associées, telles la rotation des cultures et l'introduction d'engrais verts, fait actuellement l'objet de recherches.

Une fois corrigées les déficiences chimiques et physiques des sols, le semis direct présente de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes culturaux : il maintient relativement bien l'état structural du sol et contrôle l'érosion ; en ce qui concerne perte en sol (t/ha/an) et écoulement superficiel (%), dans la région de Goiânia, sur sol ferrallitique rouge sombre et pente de 3%, les valeurs s'élèvent respectivement à 56t/ha/an et 28,9% sur sol nu avec préparation conventionnelle, 4t/ha/an et 11% pour le soja ou le maïs avec préparation conventionnelle, et tournent autour de 1,0t/ha/an et moins de 5% pour le semis direct pour ces mêmes cultures ; il offre une forte porosité, une bonne distribution de la taille des pores et un bon drainage interne ;

il favorise une bonne activité biologique, une grande variété de la faune du sol qui incorpore en profondeur des matières organiques et permet une bonne pénétration racinaire ; il minimise l'utilisation d'agrotoxiques, de combustibles et de fertilisants ; il montre enfin que des rendements élevés peuvent être obtenus pour différentes cultures économiques comme le soja, le maïs, le haricot ou le riz dans les cerrados du Brésil central.

Ces résultats sont obtenus par la méthodologie d'analyse morphostructurale (profil cultural) et par comparaison de différents systèmes de préparation du sol. Les déterminations physico-chimiques effectuées en relation avec les caractéristiques morphostructurales des sols considèrent, entre autres, la structure, la matière organique, l'activité biologique, le développement et l'orientation du système racinaire, la porosité. Les résultats sont évalués en relation avec la productivité des cultures sous différents systèmes culturaux ■

Philippe Blancaneaux



Semis direct dans un lit de pailles de céréales.

Restauration de la productivité des sols tropicaux

Pratiques antiérosives traditionnelles au Cameroun

l'élaboration des terrasses des monts Mandara et la récupération des terres hardé

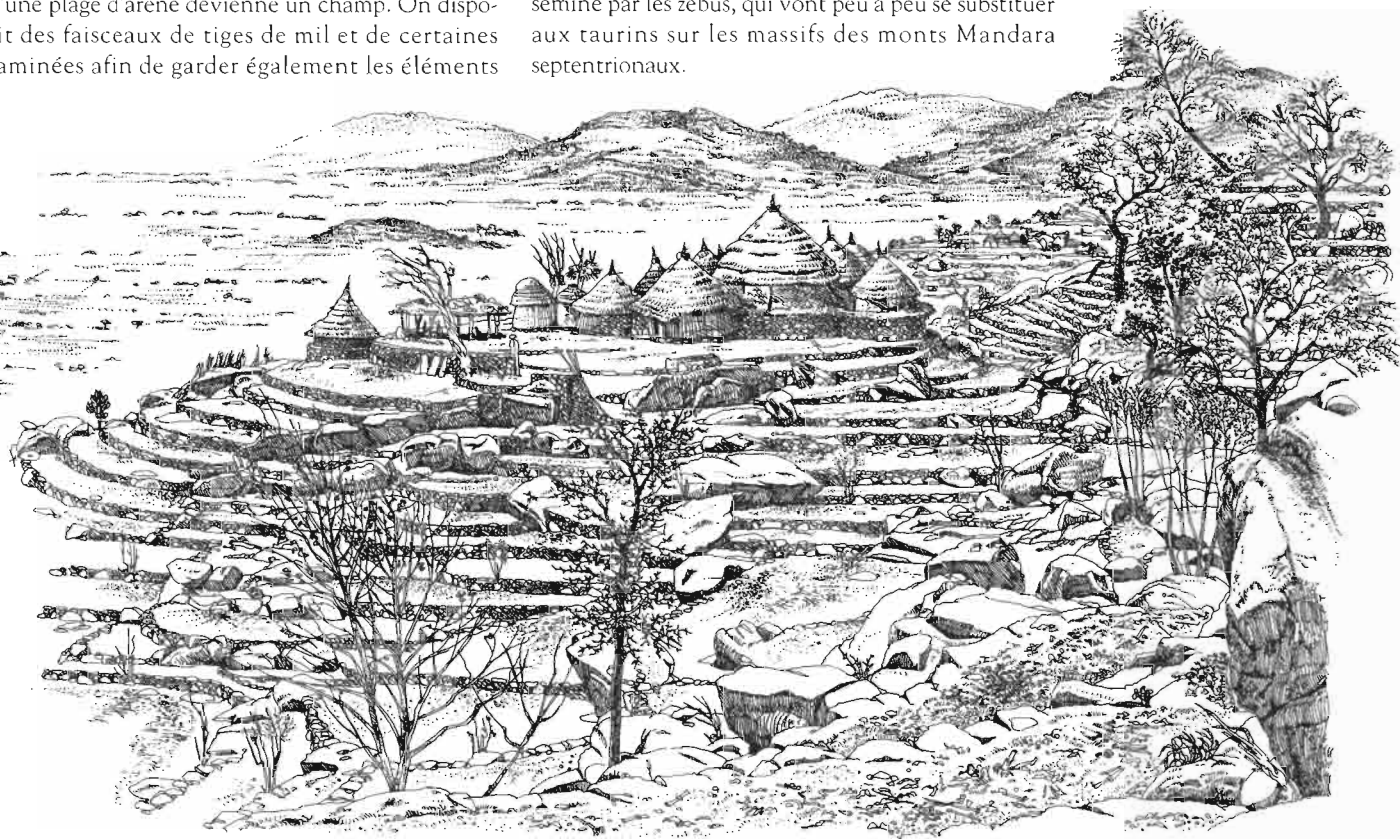
On donne souvent comme exemple de pratiques anti érosives les terrasses des monts Mandara septentrionaux qui, sur des dénivelés de plusieurs centaines de mètres, couvrent des massifs entiers. Ces aménagements, qui font l'admiration des chercheurs, leur posent également un problème : comment les populations héritières de telles pratiques s'avèrent, sur leurs piémonts et ailleurs dans leur diaspora, dans l'incapacité de les reproduire et pourquoi se montrent-elles indifférentes aux méfaits de l'érosion ?

La genèse des réseaux de terrasses peut apporter un élément de réponse. Les terrasses ont été élaborées pour créer des champs sur des pentes et parmi des chaos de blocs. Les Mofu, par exemple, montaient sur l'avant des dalles rocheuses des murets colmatés avec du gravier et des tiges de mil qui retenaient des éléments issus de la désagrégation en place des différents types de granites. Peu à peu, ils les élevaient jusqu'à ce qu'une plage d'arène devienne un champ. On disposait des faisceaux de tiges de mil et de certaines graminées afin de garder également les éléments

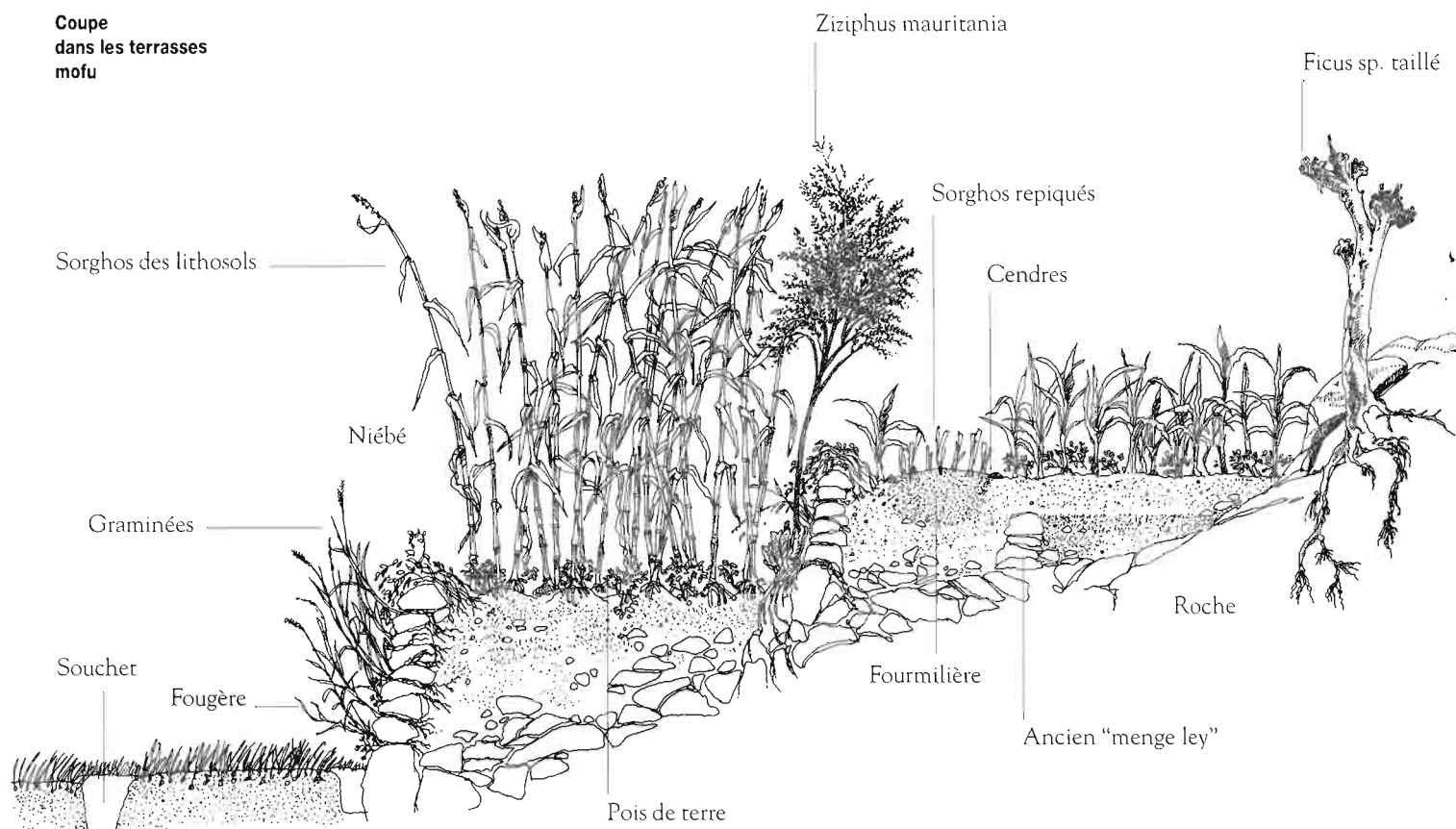
finis. On essayait aussi d'y attirer les termites.

Ce muret s'appelait *menge ley* (= piège/champ). On accélérât la désagrégation du granite en semant ou en bouturant certains ligneux¹ dans les grosses diaclases ou dans les fentes, et en plaçant du fumier dans les creux afin de mieux "pourrir" la roche. L'entretien minutieux des terrasses s'accompagnait de cultures particulières, dans les interstices des blocs, notamment des graminées aux racines stolonifères comme *Cynodon dactylon* et une petite fougère, *Adiantum philipensis*. On bouturait un certain nombre de graminées : *Rottboellia cocheninchinensis*, *Digitaria cf. argillacea*... qui donnaient deux à trois coupes pour l'affouragement du bétail claustré pendant la saison des pluies.

Sur les terrasses, l'arbre de restitution par excellence était jadis, et reste encore dans les vallées reculées, *Acacia polyacantha*. Il était taillé et sa litière retenue sous le houppier grâce à l'épandage d'une sorte de paillis de graminées. Aux XVII^e et XVIII^e siècles, il sera remplacé par *Faidherbia albida*, venu des plaines et disséminé par les zébus, qui vont peu à peu se substituer aux taurins sur les massifs des monts Mandara septentrionaux.



Coupe dans les terrasses mofu



Ainsi, la préoccupation antiérosive n'était-elle que contingente, la priorité visait la fabrication et l'enrichissement de parcelles de terre arable.

Il en était de même dans les piémonts, où les systèmes défensifs végétaux, en suivant les courbes de niveau, devenaient autant de constructions anti-érosives²

Il s'agissait, pour conserver l'exemple des Mofu, de lignes de *Commiphora africana*, complétées ou non, d'euphorbes ou d'*Acacia spp.* Ces systèmes complexes présentaient des lignes avancées uniquement composées d'*Acacia ataxacantha*, que les montagnards semailent, pendant la saison des pluies, dans les piémonts. Ils se développaient ainsi sur des kilomètres de longueur et, parfois, des dizaines de mètres d'épaisseur. Ce système buissonnant, impénétrable, qui empêchait le passage des cavaliers venant de la plaine, piégeait également des particules éoliennes fines, créant ainsi sous son couvert une sorte de limon.

Ces lignes défensives pouvaient être reportées plus en avant ou en retrait, en fonction des besoins en terre et des fluctuations démographiques. Leur emplacement, réputé très fertile, était alors mis en culture.

Les montagnards descendus en plaine ont cessé ces investissements. La terre n'est plus mesurée et il n'est pas nécessaire de créer des champs. Les contraintes des espaces fermés sont levées, place alors

aux techniques extensives économes en temps et qui rapportent rapidement.

On a incriminé l'insécurité foncière dans les piémonts et les plaines, pour expliquer le peu d'empressement à monter des réseaux anti-érosifs ou de pseudo-terrasses. Le manque de moyens en charroi, pour transporter des pierres, a également été invoqué.

Pourtant, de nouvelles pratiques intensives et anti-érosives sont mises en place sur les piémonts par ces mêmes montagnards, afin de récupérer des terres hardé (sols halomorphes). Ces terres ont été délaissées pour des motifs divers, souvent comme plaque de stationnement du bétail des villages (harde dabbaji en foulfouldé).

Pour cela, les cultivateurs pratiquent alors des trous espacés de 1,5 à 2 m, d'une coudée (35 à 40 cm) de diamètre et autant de profondeur dans l'horizon compacté. Ils répandent tout autour du fumier, puis, la deuxième ou troisième année, ils rebouchent les trous et utilisent la charrue pour une première culture de sorgho hâtif.

Ce sera ensuite des sorghos désaisonnés de type muskuwaari qui seront cultivés année après année. A ce stade, un carroyage de diguettes de 30 cm de hauteur est monté pour une meilleure contention de l'eau. Certaines graminées, *Setaria pumila*, *Setaria sphacelata*, sont parfois semées afin d'améliorer une sorte de jachère dérobée.

La restauration de ces sols halomorphes s'effec-

tue entre quatre et six ans. Elle est au service d'un vivrier marchand, le muskuwaari, particulièrement recherché.

Les amas de rochers, de même que les zones halomorphes réputées incultes, peuvent donner des champs. L'aspect antiérosif est alors compris dans leur élaboration et non comme une technique superfétatoire. Dans les deux cas, ces techniques servent des cultures considérées comme essentielles, les sorghos des lithosols de montagne et les sorghos repiqués qui, tous, se passent de jachère.

Chaque fois que l'on a voulu imposer ou encourager des pratiques antiérosives pour elles-mêmes, ce fut un échec. Elles devaient se superposer à des stratégies généralement extensives intéressant un autre type de gestion de l'espace et du temps investi.

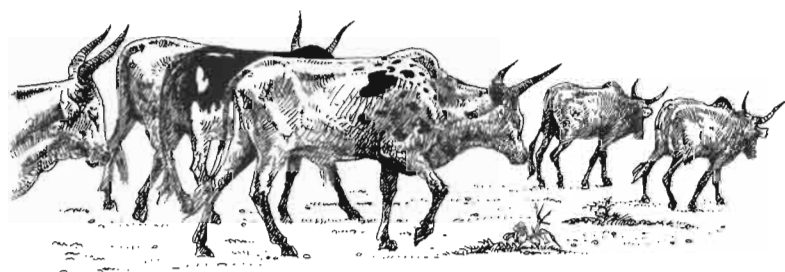
Les pratiques antiérosives ne peuvent être promues en elles-mêmes, elles doivent intégrer des types de cultures dont la performance leur est justement associée ■

Christian Seignobos

dessins : Christian Seignobos

¹ En règle générale, on favorisait la venue des ligneux sur les amas rocheux (*Ficus* spp., *Vitex doniana*, *caillédrat*...) afin que les houppiers ne gênent pas la croissance des mils et des sorghos. Les arbres sur les terrasses, souvent contre les murs de soutènement, étaient régulièrement taillés : *Ziziphus mauritiana*, *Holarrhena floribunda*...

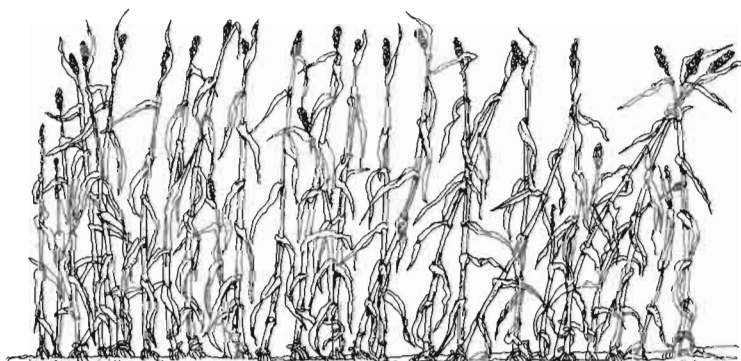
Aujourd'hui, les petits bourrelets ou les ressauts qu'ils ont créés sont encore visibles dans les piémonts.



Harde dabbji
(sol halomorphe)
dû au piétinement
du bétail



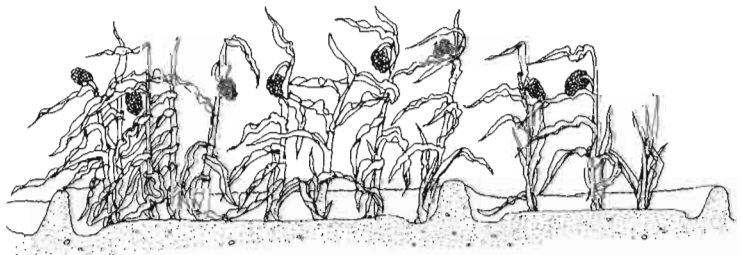
Ngaska (trou)
+ fumier
(2 à 3 ans)



Sorghos sous pluie
(*sorghum candatum*)
à cycle court
(2 à 3 ans)



Dingiiji (diguettes)
couvert de graminées
à dominante
setaria pumila
(saison des pluies)



Muskuwaari
(sorghos repiqués)
sorghum durra
sorghum candatum

Le zaï, un système traditionnel complexe de récupération des terres dégradées en Afrique soudano-sahélienne

Zaï modifié par l'OXFAM. noter le zipellé rouge sur glacis gravillonnaire de haut de pente. (Burkina Faso).

En pleine zone de savane soudano-sahélienne africaine se développent des clairières dénudées, de véritables petits déserts, des terres érodées tellement encroûtées par la battance des pluies que l'eau ne s'infiltrait plus, que les souches d'arbustes finissent par crever, que le ruissellement balaye les graines apportées par le vent et les animaux, si bien que la jachère régénératrice ne peut plus s'installer. Au Pays Mossi, on appelle zipellé de telles terres dégradées par le surpâturage ou la culture attelée : elles occupent déjà 11% de certains terroirs et ne cessent de s'étendre.

Dans cette zone semi-aride (pluies 400 à 800 mm), les techniques conventionnelles de réhabilitation de la végétation et des terres dégradées sont limitées et coûteuses. Jusque récemment, les pédologues prétendaient que le sol est une ressource non renouvelable. S'il est vrai que la régénération d'un sol superficiel sur roche dure n'est pas possible économiquement, à l'échelle humaine, il semble que certaines techniques traditionnelles permettent non pas de restaurer les caractéristiques des terres vierges, mais de rétablir la capacité de produire des végétaux.

Nous avons donc étudié en détail le zaï, une pratique africaine complexe qui permet aux paysans de récupérer en un ou deux ans les terres dégradées. Il s'agit :

- d'entourer le champ dégradé d'un cordon pierreux pour maîtriser le ruissellement,
- de creuser une cuvette (40 cm de diamètre et 15 cm de profondeur) pour piéger les eaux de ruissellement,
- de travailler le sol et d'y enfouir une ou deux poignées de poudrette, fèces séchées au soleil,
- de capturer les limons éoliens, le ruissellement et les nutriments qu'ils véhiculent,
- d'attirer certaines termites par des matières organiques pour que l'eau s'infilte profondément dans leurs galeries,
- de maintenir lors du sarclage des cuvettes (1/5 de la



Le zaï sur zipellé rouge gravillonnaire, en saison des pluies. (Yatenga, Burkina Faso).

.....

Zaï, cuvettes fertilisées de poudrette, dans un zipellé blanchi de glacis limoneux (Pays Dogon au Mali). Noter le sol encroûté et plus haut la savane sur glacis gravillonnaire.



surface), les tiges de légumineuses buissonnantes pour créer un nouveau système agro-sylvo-pastoral.

- d'attribuer aux termites une partie de la production de biomasse (les souches de sorgho).

L'expérimentation sur deux sols durant deux années aux pluies mal réparties a montré l'intérêt de la méthode, ses limites et sa diversité en fonction des paysans.

L'amélioration du zaï (par apport de 3t/ha de poudrette, fèces desséchés et de N35-P20-K10) a permis d'augmenter généreusement la production de grain (de 150 à >1500 kg/ha) et de paille (de 500 à 5300 kg/ha) sur un sol brun et de réintroduire 23 espèces d'herbes et 13 espèces de légumineuses buissonnantes.

Des variantes du zaï ont été observées au Mali, au Burkina, au Niger et au Cameroun, mais cette technique complexe n'avait jamais été testée ni améliorée dans les stations de recherche.

Paradoxalement, le zaï n'améliore que très peu les caractéristiques analytiques du sol, mais il permet pourtant de récupérer la capacité de production des terres dégradées, d'installer de nouvelles jachères fourragères et de créer un système agro-sylvo-pastoral valorisant au mieux les ressources naturelles de ces milieux fragiles.

Eric Roose*, Vincent Kabore et Claire Guenat****

email : roose@mpl.orstom.fr

*LCSC, Centre ORSTOM, BP 5045, F 34032 Montpellier, France.

**Laboratoire des sols IATE, EPFL, Lausanne, Suisse

Restauration de terres agricoles à partir de cendres volcaniques au Salvador

La moitié du Salvador est occupée par des cendres et tufs volcaniques à partir desquels se forment des sols andiques possédant une excellente fertilité ; ces sols sont malheureusement totalement érodés dans la région de San Salvador par une surexploitation liée au regroupement des populations frontalières à l'époque de la guerre civile. Les cultures vivrières (maïs, haricot) se pratiquent sur des cendres volcaniques non altérées et non organiques, d'où des rendements très insuffisants. L'érosion spécifique, évaluée à plus de 250 t/ha/an, entraîne une dégradation générale d'un des bassins versants tributaire du rio Lempa dont les eaux chargées comblent peu à peu le seul réservoir hydroélectrique du pays, le Cerron Grande qui avait un volume utile de 350 millions de m³.

Il a fallu trouver des solutions rapides et réalistes pour reconstruire des terres agricoles à partir de cendres afin d'augmenter la production en vivriers et de protéger le bassin versant contre une érosion liée autant aux écoulements superficiels qu'aux mouvements de masse. On a retenu la voie biologique en enfouissant deux types d'amendements organiques disponibles : d'abord du fumier de poules des élevages fournissant les restaurants populaires de la capitale, puis des fragments végétaux de *Gliricidia sepium*, légumineuse arborée autochtone.

Cette reconstruction a été suivie, cinq années durant, sur sept parcelles de 400m² installées en milieu paysan sur des pentes de 25 et 30% et cultivées à l'aire.

On a observé deux améliorations dès la première année : d'abord une augmentation très substantielle des rendements en maïs et haricot sur les parcelles recevant, les unes, 15 t/ha/an de fumier, les autres 18 t/ha/an de résidus sec à 30% de *Gliricidia sepium*, ceci n'est pas très surprenant puisque ces amendements apportent rapidement azote et phosphore, puis une réduction des pertes en terre de 200 à quelque 10 t/ha/an, conséquence d'une dynamique de croissance du maïs couvrant mieux le sol au moment des premières averses à fortes intensités.

A plus long terme, soit au bout de cinq ans, on a constaté : une augmentation régulière de la matière organique passant de 0,4% à 2,5% (0-25cm) dans les sols amendés, ce qui représente un progrès de quelque 60%, compte tenu de l'évolution propre des témoins. Par contre, a été observé la construction plus longue d'un complexe absorbant organo-minéral, processus témoin de la réfection du sol. Par ailleurs, l'effet de la matière organique est dépressif en deçà de taux de 2%,

au delà de cette limite la capacité d'échange cationique du sol augmente enfin de façon significative, cette évolution semble répercuter celle des composés humiques synthétisés.

Pour des améliorations de production et de réfection de sol sommes toutes voisines, d'autres arguments ont finalement prévalu pour choisir l'enfouissement du *Gliricidia sepium*. En effet :

- le fumier de poule doit être acheté puis transporté à dos d'homme sur des pistes étroites et très pentues, d'autre part, cette chaîne d'approvisionnement dépend d'une demande fluctuante de poulets vers les restaurants de la capitale,
- il a été par contre possible de construire ou d'épaissir les clôtures arbustives ou arborées de *Gliricidia sepium* pour produire 8 à 10 t/ha/an de matière végétale (arbustes bouturés de cinq ans), ainsi, une clôture ceinturant une parcelle de 1,5ha peut fournir 50% de l'amendement nécessaire, le reste étant récolté dans des plantations situées sur des pentes non cultivables,
- l'exiguïté des parcelles des precatistos est parfaitement adaptée à une transformation du versant en une mosaïque de barrières arborées assurant une protection vis à vis des risques érosifs liés aux flux superficiels (ruissellements) et profonds (glissements de terrain), la restauration biologique a ainsi permis de tirer profit d'une situation initialement désavantageuse ■

Jean Collinet

email : jean.collinet@orstom.intl.tn



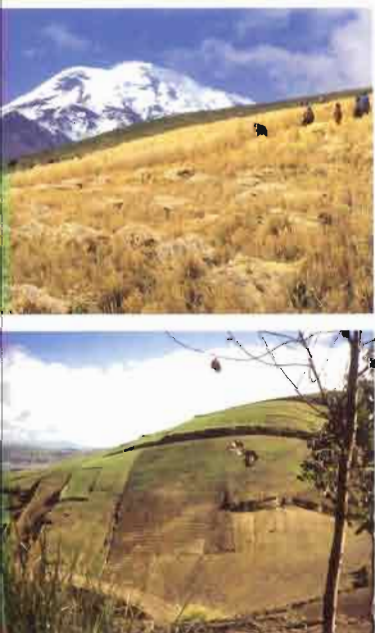
1992, région de San Salvador, parcelles paysannes sur cendres volcaniques.

Région de San Salvador, coupe dans des cendres volcaniques pléistocènes.



Les sols volcaniques indurés d'Amérique latine

Les sols volcaniques, ou andosols, sont connus pour leur fertilité et leur stabilité intrinsèques, très attractives pour les populations rurales. Néanmoins, les recherches menées par l'Orstom en Amérique latine ont montré, pour la première fois, l'existence dans ces sols d'horizons indurés qui sont associés à des paysages où les phénomènes d'érosion et de dégradation des sols sont importants. Ce type d'andosol occupe de vastes surfaces au Mexique ainsi que dans les Andes d'Equateur. Dans ce dernier pays, les andosols à horizons indurés sont appelés "cangahua" et sont localisés principalement dans les régions centre et nord du bassin intra-andin où s'est déposée la majeure partie des projections pyroclastiques émises par d'imposants strato-volcans tels le Chimborazo (6 310 m) ou le Cotopaxi (5 900 m).



Les volcans, nombreux en Equateur, ont émis de puissants dépôts dont la cangahua. Ici, le sommet enneigé du Chimborazo, le plus haut volcan du pays avec 6 310 m.

L'érosion décape progressivement les sols et fait affleurer la cangahua indurée (taches discontinues de sol marron-jaune).

La cangahua occupe 20 % environ des terres volcaniques du bassin (soit 3 000 km²) et se situe entre 2 000 et 2 800 m (climat subhumide, 600 mm/an) ; elle disparaît en altitude lorsque le climat devient plus humide. Ces sols n'affleurent qu'après le décapage par l'érosion hydrique des sols plus meubles qui les coiffent, sols bruns vertiques ou sols sablo-ponceux selon les zones. En l'état naturel, la cangahua est impropre à l'agriculture du fait de sa dureté et de sa compacité permanentes. Après ameublissement pour la réhabilitation agricole et sans régénération adaptée, ce sont des sols très battants et érodibles et à faible productivité. En effet, la cangahua est fortement carencée en matière organique (< 0.3 %), en azote (< 0.04 pour 1 000) et en phosphore total et assimilable, < 3 ppm. Aussi, les régions où progresse spatialement la cangahua périlicent et se vident progressivement de leurs habitants. Pour lutter contre cette évolution et mieux connaître le rôle des principaux facteurs mis en jeu, l'Orstom avec le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage a mené des recherches (parcelles de ruissellement et pluies simulées) pour caractériser le comportement à l'érosion de la cangahua, en situation indurée et réhabilitée.

Sur cangahua indurée, la conductivité hydraulique est faible, de l'ordre de 5 à 15 mm/h au champ et les coefficients de ruissellement dépassent rapidement 80% lors de fortes pluies. En général, l'eau n'incise pas le matériau qui est dur (érosion en nappe) et les pertes en terre sont faibles, moins de 10 t/ha/an.

En situation réhabilitée, après pulvérisation et émiettement de la cangahua, le comportement hydrodynamique du matériau change radicalement par rapport à la situation initiale : le ruissellement atteint le régime permanent plus tardivement, par contre, les

pertes en terre sont élevées. Par exemple sur cangahua réhabilitée non billonnée, l'érosion est comprise entre 50 et plus de 100 t/ha/an, la fraction fine inférieure à 2 mm se montrant particulièrement érodible. Sur cangahua réhabilitée billonnée, le travail isohypse du sol réduit sensiblement l'érosion à moins de 50 t/ha/an, néanmoins sur les pentes supérieures à 15-20% l'énergie du ruissellement donne naissance à un réseau de griffes et de rigoles qui incisent profondément les flancs des billons. En outre, la préparation du sol en billons accroît la proportion d'éléments fins, inférieurs à 2 mm. Pour améliorer le système, les recherches ont permis de tester, expérimentalement d'abord puis en vraie grandeur, l'efficacité de structures isohypses construites avec des matériaux locaux (murets en blocs de cangahua et bandes enherbées), évoluant en pseudo-terrasses. Après cinq années d'observation, les pertes annuelles moyennes en eau et en sol étaient inférieures respectivement à 10% et à 5 t/ha/an. Les compléments apportés par une fertilisation minérale et organique adaptée, liée à une amélioration variétale des semences, ont permis d'obtenir des rendements satisfaisants et durables ■

Georges De Noni et Marc Viennot,
Orstom Montpellier,
G. Trujillo,
ministère de l'Agriculture et de l'Elevage,
Quito (Equateur)
email : denoni@mpl.orstom.fr

Pour en savoir plus

Custode E., De Noni G., Trujillo G., & Viennot M., 1991 - La cangahua en el Ecuador caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión, in Suelos volcanicos endurecidos. 1 carte et 10 tab., Mexico, p. 332-346.
De Noni G., Janeau J.L., Prat C., Trujillo G., Viennot M., 1994 - Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Equateur, Mexique et Nicaragua) :

impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole, XV^e Congrès International de Science du Sol, vol. 6 a, Commission V, 10-16 Juillet 1994, Acapulco (Mexique), 554-570.
De Noni G., Viennot M. et Trujillo G., 1996 - Ruissellement et érosion sur des parcelles de cangahua récupérée (période 1994-96), in " Sols volcaniques indurés " (510 p.), III^e Symposium International, Quito, 331-342.

L'habilitation agricole des tufs volcaniques indurés ou "tepetates" dans l'altiplano mexicain

Le Mexique, pays grand comme quatre fois la France, n'a que 10% de ses terres cultivées. Situées principalement dans les vallées des hauts plateaux volcaniques, elles disparaissent non seulement sous le béton à cause de l'explosion démographique, mais aussi sous l'effet de la dégradation du milieu du fait d'une mauvaise gestion des espaces naturels et agricoles. Or, une fois les sols disparus, il ne reste que des couches très dures, stériles qui ne peuvent plus être cultivées. Ces espaces ne sont alors utilisés que comme parcours de mauvaise qualité pour le bétail. De plus, pratiquement imperméables, ces affleurements, en favorisant le ruissellement des pluies, accélèrent la dégradation des terres en aval. Ce sont ces couches, horizons volcaniques indurés, que l'on nomme "tepetates", terme nahuatl qui signifie "lits de pierre".

C o-financée par l'UE, l'étude des tepetates et de leur mise en culture est menée depuis plus de dix ans par l'Orstom en partenariat avec des universités et centres de recherche mexicains et allemands. Les travaux ont d'abord porté sur la caractérisation des tepetates puis sur les conditions de la mise en culture durable d'un sol créé à partir de ces matériaux.

Les résultats obtenus sont particulièrement riches et nombreux. Il a ainsi été montré que les tepetates se rencontrent sous des climats sub-arides ou sub-humides avec une saison sèche marquée, sur les versants des massifs volcaniques qui traversent le centre du Mexique d'est en ouest. Les tepetates correspondent à des tufs volcaniques relativement jeunes (de 10 à 40 000 ans) recouvert par des cendres fines qui ont formé des sols. Les études menées depuis un niveau microscopique à celui du paysage en passant par les transects, montrent que l'induration des tepetates est principalement liée à la genèse passée de ces matériaux volcaniques et non à des processus pédologiques actuels. Une nouvelle induration après leur mise en culture, via leur défonçage sur 40 cm de profondeur par des bulldozers, n'est donc pas à craindre.

Parce que les tepetates sont massifs, peu poreux, quasi-stériles, dépourvus d'azote et de matière organique, carencés en phosphore, avec une vie microbiologique très réduite, il est indispensable de développer une gestion des sols et des cultures en fonction de ces limitations. Pour cela, il faut utiliser une fertilisation raisonnée, appliquée en 2 ou 3 fois. Le fumier, associée à un apport minéral en début de cycle, est préférable à des fertilisants purement minéraux (bien que ces derniers soient aussi très efficaces seuls). Ainsi, on peut obtenir des rendements nor-

maux pour la plupart des espèces dès la première année de mise en culture (le maïs, plante exigeante, n'est véritablement rentable qu'en seconde voire, troisième année). La rotation des cultures associées type: céréale - graminée (maïs) - graminée (maïs) - graminée (maïs) ou céréale et l'association céréale ou graminée/légumineuse donne de meilleurs rendements qu'une monoculture de céréale ou graminée. Le labour croisé tout en réduisant l'érosion des sols, contribue également à favoriser une meilleure productivité. Même si les pluies dans ces régions sont moyennement agressives à l'échelle de l'année, et que moins d'une dizaine de celles-ci génèrent 80% de l'érosion, il est indispensable de contrôler l'érosion sous peine de voir le nouveau sol disparaître. Ainsi, d'un tepetate affleurant en haut de versant qui génèrent de 20 à 30 t de sédiments/ha/an, jusqu'à 100 t en bas de versant du fait de l'érosion régressive, on passe à 2 - 3 t/ha/an en tepetate cultivé en terrasse. Ainsi, la mise en culture des tepetates non seulement crée de nouvelles terres, mais régule également le cycle de l'eau et limite les pertes en sol.

Les études socio-économiques au sein de familles et de communautés paysannes montrent qu'il existe non seulement des besoins mais aussi une attente pour mettre en culture les tepetates. Toutefois, il reste à préciser les liens existants entre les usages des tepetates naturels et des forêts comme zones de parcours et de pâturage du bétail et l'apparition et l'extension des tepetates affleurants. Les solutions agricoles préconisées sont bien à la portée des paysans, malheureusement, les coûts des travaux (1500 \$/ha) impliquent un investissement hors de portée de la majorité des paysans concernés. Il est donc capital que les politiques agricoles prennent en charge une partie de ces coûts. Si c'est déjà le cas dans quelques États, il reste que pour la majorité d'entre eux il n'y a guère de mobilisation, en partie par manque d'informations.

C'est pourquoi, une troisième et dernière phase de ce programme vise d'abord à vérifier la validité de nos résultats sur l'ensemble de l'axe néovolcanique à travers des études de télédétection et d'enquêtes sur le terrain, puis à proposer aux responsables politiques un système informatique d'aide à la décision. Parallèlement, une collaboration avec les universités et centres de recherches locaux, permettra de mieux valoriser l'ensemble de ces résultats.

Christian Prat, Claude Zebrowski
et Paul Quantin

email : Prat@mpl.orstom.fr

VIENT DE PARAÎTRE

Mieux connaître les outils de l'analyse des sols pour mieux les utiliser : tel est l'objectif de cet ouvrage. Face aux méthodes et techniques d'analyse de plus en plus nombreuses, ce volume conçu comme un guide permettra d'abord de choisir la méthode adaptée au problème et ensuite de la mettre en œuvre.

La première partie est consacrée aux problèmes d'échantillonnage. Les questions liées à l'analyse proprement dite et au contrôle des résultats font l'objet de la seconde partie. Ce manuel de référence dresse l'inventaire des outils d'échantillonnage, d'analyse et de contrôle dont disposent aujourd'hui les "sciences du sol".

