

CAHIERS ORSTOM

An abstract painting with a grid of thin lines. The colors are primarily warm, including shades of brown, orange, yellow, and red, with some cooler tones of blue and grey. The texture appears to be that of a thick, expressive brushstroke. The overall composition is a large, textured rectangle with a grid overlay.

PÉDOLOGIE



Depuis 1962, les Éditions de l'Orstom publient :

dans les cahiers de Pédologie, des travaux consacrés à l'étude des sols : morphologie, caractérisations physico-chimique et minéralogique, classification, relation entre sols et géomorphologie, problèmes liés aux sels, à l'eau, à l'érosion, à la fertilité.

En dehors des articles des cahiers, les études sont publiées sous forme de documents divers, dont la liste figure au catalogue des éditions de l'Orstom.

COMITÉ SCIENTIFIQUE

- | | |
|---|--|
| G. AUBERT, membre de l'académie d'Agriculture (France) | J. KILIAN, chef de l'unité pédologique à l'Irat |
| P. AUDRY, directeur de recherches à l'Orstom | N. LENEUF, professeur à l'université de Dijon (France) |
| M. BECH-BORRAS, professeur à l'université de Barcelone | J.C. LEPRUN, directeur de recherches à l'Orstom |
| J. BOULAIN, professeur à l'Institut national agronomique Paris-Grignon (France) | A. MELFI, directeur de l'institut de géo-sciences à l'université de Sao Paulo (Brésil) |
| G. CALLOT, directeur de recherches à l'Inra | G. MILLOT, membre de l'académie des Sciences (France) |
| C. CHEVERRY, professeur à l'Ensa de Rennes | R. MOREAU, chargé de recherches à l'Orstom, responsable de l'UR 509 |
| P. DUBREUIL, vice-président de la commission hydrologie-pédologie | G. MURDOCH, Head, Soil Science and Geomorphology Section (Royaume Uni) |
| P. DUCHAUFOR, directeur honoraire du centre de pédologie biologique, Vandoeuvre-les-Nancy | A. OSMAN, directeur de la division science du sol Acsad (Syrie) |
| R. DUDAL, professeur à l'université catholique de Louvain | M. RIEU, directeur de recherches à l'Orstom |
| H. FAURE, professeur à l'université de Marseille (France) | M. ROBERT, directeur de recherches à l'Inra |
| E. FERNANDEZ-CALDAS, professeur d'édaphologie à l'université de la laguna à Ténérife, Iles Canaries (Espagne) | A. RUELLAN, professeur de pédologie |
| A. FINCK, professeur à l'université de Kiel (RFA) | K.F. SEDDOH, recteur de l'université de Lomé (Togo) |
| M. GAVAUD, directeur de recherches à l'Orstom | G. STOOPS, professeur à l'université de Gand (Belgique) |
| M.C. GIRARD, maître de conférence | G. SYS, professeur à l'université de Gand (Belgique) |
| S. HENIN, membre de l'académie d'Agriculture (France) | Y. TARDY, professeur à l'université L. Pasteur de Strasbourg |
| A. HERBILLON, professeur à l'université de Nancy I | F. TOUTAIN, directeur de recherches au CNRS Nancy |
| F. X. HUMBEL, directeur de recherches à l'Orstom | J. TRICHET, professeur à l'université d'Orléans (France) |
| M. JAMAGNE, chef du service des sols et de la carte pédologique de France | A. VAN WAMBEKE, professeur à l'université Cornell (USA) |
| | B. VOLKOFF, directeur de recherches à l'Orstom, responsable de l'UR 104 |

Rédacteur en chef : G. PEDRO, président de la commission hydrologie-pédologie Orstom

Secrétaire de rédaction : M. MISSET, Orstom, commission scientifique pédologie (C.S.2), 213, rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10

Prix du volume (2 numéros)

Price per volume (2 issues)

France : 180 F

Tarif étudiant : 145 F

Étranger (surface) / *Foreign (surface)* : 225 F

Étranger (avion) / *Foreign (air)* : 270 F

Veuillez adresser votre commande à votre librairie ou à* / *Please send your order to your bookseller or to**

*Orstom Éditions-Diffusion

32, av. Henri-Varagnat - F - 93143 Bondy cedex

Paiement par virement postal à l'ordre de ** (ou par chèque barré) / *Please pay by giro transfer to** (or by crossed check)*

** Régisseur d'avance et de recettes de l'Orstom Bondy

CCP : Paris 9152-54 X

Volume XXVIII

N° 2 — 1993

CAHIERS ORSTOM
série PÉDOLOGIE

Spécial Érosion

Réhabilitation des sols et GCES

Éditions de l'Orstom

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

PARIS — 1996

Les Cahiers Orstom, série Pédologie cessent de paraître après la publication de ce numéro du volume XXVIII - 1993.

The Cahiers Orstom, série Pédologie will suspend their publication after this n° 2 of volume XXVIII - 1993.

Manuscrits déposés le 15 avril 1996 au Secrétariat des éditions de l'Orstom

.....

« La loi du 11 mars n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal ».

Présentation

Innovations dans la conservation et la restauration des sols

Éric ROOSE

L'érosion est un processus vieux comme le monde. Dès l'origine, l'érosion a façonné les paysages et construit les plaines, lesquelles nourrissent la majeure partie des populations du globe. Chaque civilisation, en agglomérant les peuples autour des villes, a créé des conditions favorables à l'accélération de l'érosion et de la dégradation des sols. Face aux risques liés à ces processus, les sociétés rurales ont élaboré progressivement des techniques permettant de maintenir la productivité des terres : irrigation, fumure organique, jachère, structures antiérosives, etc. Mais, lorsque les besoins évoluent trop vite, se développe une crise à la fois socio-économique et écologique à laquelle la société rurale tente de répondre soit par l'émigration d'une partie de la population, soit par la mise au point de nouvelles techniques plus intensives de gestion durable. La figure 1 schématise l'évolution des systèmes de production en fonction de la densité de la population et des crises de l'environnement en Afrique.

L'ambition de ce troisième numéro consacré à l'érosion, et dernier de la série *Pédologie des Cahiers Orstom* est de rassembler des témoignages de chercheurs travaillant dans des conditions écologiques et humaines très variées, de montrer les progrès réalisés dans le choix des stratégies de gestion durable des sols et les possibilités de restaurer la capacité de production des terres dégradées et, enfin, d'ouvrir des perspectives sur les problèmes de gestion de l'eau en montagne où la battance des pluies n'est pas le processus dominant.

ÉVOLUTION HISTORIQUE DES STRATÉGIES DE LUTTE ANTIÉROSIVE

Les stratégies traditionnelles : adaptation à des contraintes socio-économiques

Depuis 7 000 ans, l'homme a accumulé des traces de sa lutte pour maîtriser les différentes formes d'érosion et améliorer la gestion de l'eau et de la fertilité des sols

(LOWDERMILK, 1953). L'analyse de la répartition spatiale des méthodes de lutte et des causes de leur disparition montre que l'efficacité des méthodes traditionnelles est strictement liée aux conditions économiques des sociétés où elles se sont développées. Deux exemples l'illustreront.

La culture itinérante sur brûlis est probablement la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents pour maintenir la productivité de la terre et du travail. Pour que le système (brève culture sur brûlis, suivie d'une longue jachère) reste équilibré, il faut une réserve de terre considérable (dix à vingt fois la surface cultivée). Cette stratégie ne s'applique donc que dans des zones peu peuplées (moins de 20 à 40 habitants au kilomètre carré selon la productivité régionale), sur des sols suffisamment profonds et dans le cadre d'une économie d'autosubsistance. Que les besoins et la pression foncière augmentent, la durée de la jachère va diminuer et le système se dégrader (voir au Sahel ou au Rwanda et au Burundi) (fig. 1).

À l'opposé se sont développées les terrasses en gradins irriguées (2 000 ans avant J.-C. en Asie) et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres (1 000 ans après J.-C. en Crète et au XIV^e siècle au Pérou), là où la population est dense, la terre cultivable rare (hormis en montagne) et le travail bon marché. Comme ces aménagements exigent un gros effort pour la construction des structures (1 000 jours par homme et par hectare), l'entretien des sols et la restauration de la fertilité, ces améliorations foncières ne sont acceptées que là où les paysans n'ont pas d'autre choix pour subsister (pression militaire, religieuse ou économique) ou pour produire des cultures particulièrement rentables (par exemple, la vigne en Suisse, les fleurs à Nice ou le cannabis dans le Rif marocain).

Mais, actuellement, la mécanisation de l'agriculture, les salaires dans l'industrie, la crise économique et la désintégration des sociétés traditionnelles entraînent l'abandon de ces techniques anciennes, si bien décrites par les ethnologues, mais méprisées par les technocrates (CRITCHLEY

et al., 1992). L'étude détaillée de leur extension, de leurs limites et des améliorations possibles ouvre de nouveaux horizons pour une nouvelle voie de recherche (ROOSE et al., 1994).

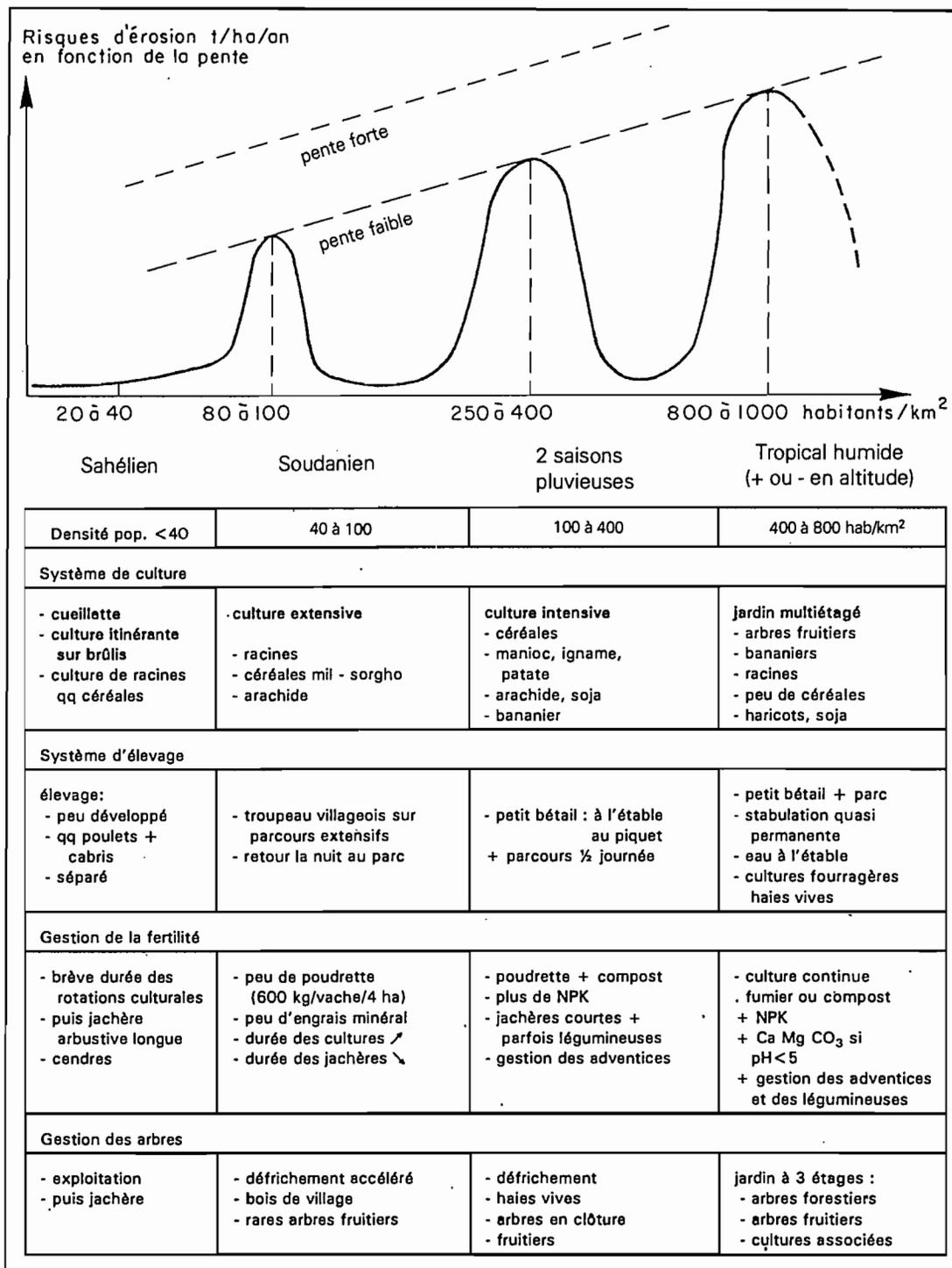


FIG. 1. — Relation entre la densité de la population, l'érosion, le système de culture, le système d'élevage et la gestion de la fertilité. Ce schéma adapté à l'Afrique devra être nuancé en fonction de la fréquence des pluies, de la pente et des potentialités des sols. D'après ROOSE, 1994.
Relation between population density, erosion, farming system, animal husbandry and nutrients management. This draft adapted from Africa must be nuanced in relation to rainfall frequency, slope steepness and soil productivity. After ROOSE, 1994.

Les stratégies modernes d'équipement hydraulique des campagnes : la logique de l'État

À l'occasion de graves crises se sont développées des stratégies modernes d'équipement hydraulique des campagnes. Il s'agit essentiellement de reforestation des hautes vallées, d'amélioration foncière, de correction du réseau de drainage et de terrassements. La priorité a été donnée à la réalisation de dispositifs mécaniques de gestion des eaux.

À partir de 1850, la Restauration des terrains en montagne (RTM) s'est développée en France pour faire face à la crise des petits paysans montagnards qui ne pouvaient survivre sans mener leurs troupeaux sur les terres communales déjà surpâturées. La dégradation des couvertures végétales et pédologiques a entraîné le développement catastrophique des torrents. Pour protéger les vallées aménagées et les voies de communication des masses de terre mobilisées par ces derniers, les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents (LILIN, 1986).

Dès la crise de 1930, le Service de conservation de l'eau et des sols (CES) a été instauré aux États-Unis d'Amérique par des agronomes pour conseiller les fermiers volontaires qui demandaient un appui technique et financier afin de lutter contre l'érosion. En effet, l'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes (coton, arachide, maïs) dans la Grande Prairie a déclenché une érosion éolienne catastrophique : des nuages de poussière obscurcissaient le ciel en plein jour. En pleine crise économique, 20 % des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous la pression de l'opinion publique, l'État a dû réagir : sous l'impulsion de Bennet se sont mis en place un programme de recherche sur les facteurs de l'érosion et un programme de lutte antiérosive (LAE) au niveau des versants.

Deux écoles s'affrontent encore sur l'approche des problèmes de lutte antiérosive :

— l'une, sous l'impulsion de BENNET (1939), organise la LAE autour des moyens mécaniques de réduction de la vitesse et de l'énergie du ruissellement pour réduire le ravinement (invention des terrasses de diversion des eaux de ruissellement vers des exutoires enherbés, validée sur les sols argilo-limoneux) ;

— l'autre, à la suite des travaux de ELLISON (1944) sur la battance des gouttes de pluie et des équipes de WISCHMEIER et SMITH (1960), organise la LAE au niveau des systèmes de culture pour réduire le volume et la vitesse du ruissellement sur les champs en améliorant le couvert végétal (STALLINGS, 1953) et la rugosité du sol (techniques culturales et gestion des résidus de culture).

Dans les années 1940-1980, la Défense et restauration des sols (DRS) a été développée par les forestiers autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves pro-

blèmes de pénurie d'eau, d'envasement des barrages et de dégradation des équipements et des terres. La DRS est née d'un mariage de raison entre la RTM des forestiers (reforestation des hautes vallées, correction torrentielle) et la CES des agronomes (diverses banquettes plantées d'arbres fruitiers). Pour les forestiers, il s'agissait avant tout de mettre en défens les terres dégradées par la culture et le surpâturage, de reforester les hautes vallées et de restaurer par l'arbre la capacité d'infiltration des sols, celui-ci étant considéré comme le moyen le plus efficace pour les régénérer. Tous les problèmes ne naissent-ils pas du surpâturage et du défrichement abusif de la végétation naturelle ? (PUTOD, 1956 ; PLANTIÉ, 1961 ; MONJAUZE, 1962 ; GRÉCO, 1978).

Cependant, depuis les années 1975-1980, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches technocratiques d'équipement menées rapidement, sans l'avis des « populations bénéficiaires ». Aux États-Unis, malgré cinquante ans de travaux remarquables des services de CES et les millions de dollars investis chaque année, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an de sédiments, limite de tolérance pour les sols profonds (LOVEJOY et NAPIER, 1976 ; HUDSON, 1991). Si la fréquence des vents de sable a été réduite, la pollution des eaux, les inondations catastrophiques et l'envasement des barrages posent encore de graves problèmes. En Algérie, malgré 800 000 ha de reforestation et la construction de banquettes sur 350 000 ha, la dégradation de la végétation et des sols s'accélère, l'envasement des barrages et le manque de bois restent des problèmes préoccupants. En Afrique de l'Ouest et au Maghreb, des paysans préfèrent abandonner leurs terres aménagées par l'État plutôt que d'entretenir les structures antiérosives car ils craignent qu'il ne s'agisse d'un piège de ce dernier pour s'emparer de leurs terres (HEUSCH, 1986).

Des stratégies participatives (*Land husbandry* et GCES) : la logique paysanne

Au séminaire de Porto Rico, en 1987, furent analysées les causes de l'échec des projets de LAE. Une nouvelle stratégie participative y est née, tenant mieux compte des besoins des paysans et des éleveurs et visant à valoriser la terre et le travail en améliorant le système de culture : l'enracinement des plantes, l'infiltration de l'eau et la fertilité du sol. Cette stratégie a été nommée « *Land husbandry* » en anglais (SHAXSON *et al.*, 1989 ; HUDSON, 1992) et « Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols » (GCES) en français (ROOSE, 1987, 1994). Étant donnée la nécessité de la participation paysanne pour assurer la pérennité (voire l'extension) des aménagements, une telle stratégie tient compte de la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et propose l'intensification de la productivité des

terres pour faire face à la croissance démographique qui double la population tous les vingt ans.

Les résultats récents ont bien montré qu'il ne suffit pas de conserver l'épaisseur des sols pour intensifier, ni même maintenir, la productivité des terres : les méthodes de terrassement exigent des travaux considérables pour leur mise en place et pour leur entretien, mais n'ont pas amélioré la productivité des sols, ni même réduit leur vitesse de dégradation. Dans le cadre de la GCES, la nouveauté consiste justement à gérer au mieux les terres productives, l'eau, les matières organiques et les nutriments indispensables au développement des cultures. L'intensification de la production augmente la couverture végétale, l'activité de la faune et la rugosité de la surface du sol : elle réduit indirectement les risques de ruissellement et d'érosion. La lutte antiérosive n'est donc plus une fin en soi, mais elle fait évidemment partie du paquet technologique qui permet d'assurer la gestion durable de la couverture pédologique.

Les stratégies d'équipement ont porté en priorité sur les terres dégradées d'où proviennent la majorité des sédiments qui polluent les eaux indispensables aux villes, aux industries et à l'irrigation des plaines fertiles. En créant des banquettes sur les mauvaises terres (*badlands* ou *roubine*), on ne s'attaque pas aux causes de l'érosion : les terres productives continuent à se dégrader. Les paysans préfèrent investir d'abord dans leurs terres productives pour tirer le meilleur revenu de leurs améliorations foncières. « Mieux vaut prévenir que guérir » et l'expérience de cinquante ans de CES et DRS a montré qu'on n'arrive pas à éteindre les foyers d'érosion.

LES FACTEURS DE L'ÉROSION EN MILIEU TROPICAL

L'érosion est l'un des processus les plus actifs de la dynamique actuelle des couvertures pédologiques. Elle a souvent été présentée comme un danger majeur pour les sols, soit qu'elle appauvrisse sélectivement l'horizon superficiel de sa substance vitale (matières organiques vivantes ou mortes, argiles, limons et nutriments), soit qu'elle décape les horizons superficiels parfois jusqu'à la roche. Mais l'érosion est aussi à l'origine du rajeunissement des sols de montagne et de la formation des plaines les plus fertiles.

L'étude des causes, des facteurs et des processus d'érosion en milieu tropical a été plus poussée qu'en milieu tempéré européen : en effet, l'agressivité des pluies et l'évolution rapide des matières organiques en milieu chaud accélèrent l'érosion qui sanctionne très vite les systèmes de production déséquilibrés.

On a cru les sols tropicaux particulièrement fragiles jusqu'à ce qu'on démontre l'agressivité remarquable des pluies tropicales (cinq à vingt fois plus agressives que

celles des régions tempérées) (ROOSE, 1973, 1977 ; ROOSE et SARRAILH, 1989-1990). En réalité, les sols tropicaux résisteraient plutôt mieux à l'énergie des pluies que la majorité des sols bruns lessivés des régions tempérées, mais leur fertilité chimique disparaît aussi vite que la matière organique du sol.

On a longtemps pensé que l'érosion était directement fonction de la pente et de sa longueur : toutes les équations fixant l'écartement entre les structures antiérosives sont basées sur cette hypothèse. Or, en 1972, HEUSCH a montré que, sur les vertisols sur marne du Rif marocain, les risques d'érosion en nappe sont bien plus élevés en bas de versant (sur pente faible) que sur les fortes pentes en haut de versant. Depuis, ROOSE (1973) a observé, sur des sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire, que lorsque la pente augmente de 4 % à 22 % l'érosion augmente exponentiellement, mais le ruissellement diminue. PLANCHON (1991) a montré en savane humide que le ravinement et les transports solides sont discontinus le long des versants. En Algérie, les résultats des mesures en parcelles montrent qu'il n'y a pas de liaison directe entre la pente et les pertes en terre : le ruissellement a tendance à diminuer (ROOSE et ARABI dans ce *Cahier*). Ce faisceau de résultats remet sérieusement en cause les méthodes classiques d'aménagement de bassin versant s'appuyant sur les cartes de pente, des sols et d'occupation des sols : on ne peut faire l'économie de l'étude du fonctionnement de la couverture pédologique.

Enfin, le couvert végétal a été rapidement reconnu comme le facteur le plus déterminant de l'érosion (STALLINGS, 1953 ; HUDSON, 1992 ; ROOSE, 1973). Il faut cependant distinguer nettement la « canopée », qui domine le sol de quelques décimètres ou mètres, des litières qui traînent à la surface du sol et absorbent non seulement l'énergie des gouttes de pluie et les restituent sans énergie, mais interceptent aussi l'énergie du ruissellement (WISCHMEIER et SMITH, 1978). Alors qu'il n'est pas toujours facile d'augmenter la densité de plantation, on s'oriente aujourd'hui vers le semis direct (LAL, 1976) et la gestion des adventices, des légumineuses de couverture ou des résidus de culture à la surface du sol (KLEIN, 1994 ; SÉGUY et BOUZINAC, 1995 ; BOLI, 1996). Pour réduire l'érosion de 50 %, il suffit d'une couverture de 30 % de litière ou de 60 % de canopée haute de 50 cm !

LE CONTENU DES TROIS CAHIERS ORSTOM « SPÉCIAL ÉROSION »

En trente ans, les *Cahiers Orstom, série Pédologie* ont publié plus de soixante-dix articles concernant l'érosion, ses facteurs de variation et les moyens de lutte antiérosive ; les uns sont dispersés au fil des ans (dynamique actuelle, matière organique et stabilité structurale), mais la plupart sont regroupés dans trois numéros spéciaux.

Le numéro 22, 2 (1986) présente treize articles sur l'efficacité relative des méthodes de conservation des sols dans différentes régions d'Europe, d'Amérique latine, d'Afrique soudanienne et des montagnes méditerranéennes. L'érosion y est déjà présentée comme un signal d'alarme avertissant du déséquilibre prononcé entre le milieu écologique et le mode de gestion. On y souligne la dissociation possible des zones de naissance du ruissellement (par encroûtement de surface ou par saturation) et des zones d'érosion linéaire (dans les bas de pente). Les terrasses sont fortement critiquées car elles ne s'attaquent pas aux causes du ruissellement ni de l'érosion, mais tentent d'en réduire les conséquences à l'aval. Les approches biologiques, qui corrigent le système de production ou qui ralentissent la nappe ruisselante et dissipent son énergie, semblent plus performantes que les techniques purement mécaniques des banquettes de diversion. Une analyse fine des méthodes traditionnelles de gestion des eaux de surface (*jessour*, cordons de pierres, haies vives et autres microbarrages perméables dissipant l'énergie du ruissellement) montre qu'elles sont finalement moins coûteuses, mieux acceptées par les paysans et plus efficaces que les terrassements conventionnels.

Le numéro 25, 1-2 (1989-90) rassemble quinze articles consacrés à l'érodibilité des sols — c'est-à-dire à la résistance du sol à différents processus d'érosion — et à l'érodibilité des terres en fonction de leur pente, des techniques culturales et des cultures, de l'érodibilité du sol et des pratiques antiérosives. La diversité des processus d'érosion nécessite des approches à différentes échelles de temps et d'espace, combinant des mesures de terrain sous pluies naturelles ou simulées à divers tests de laboratoire : on n'a pas trouvé de test universel.

Le présent numéro propose cinq articles sur la réhabilitation des sols, neuf articles sur la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, et deux notes techniques sur des méthodes simples permettant de mieux évaluer la dynamique de l'eau sur un versant. Il a fallu deux années à l'éditeur scientifique pour réunir l'ensemble des résultats disponibles sur ces thèmes, de telle sorte que certaines références citées sont postérieures à 1993. Cependant, il eût été dommage de ne pas regrouper l'ensemble de ces résultats positifs alors que s'achève la série *Pédologie des Cahiers de l'Orstom*.

La restauration/réhabilitation des sols

Pour les écologistes, la restauration au sens strict consiste à interrompre les facteurs de dégradation pour permettre au milieu de retrouver naturellement la flore et la faune primitives (ARONSON *et al.*, 1993). Comme on ignore souvent la composition du milieu primitif, la restauration au sens large correspond à l'arrêt de la dégradation et à l'orientation du système perturbé vers ce qu'on suppose être l'écosystème équilibré primitif. Mais, si la dégrada-

tion a dépassé certains seuils irréversibles, le milieu ne peut plus être restauré naturellement. On parle de réhabilitation lorsqu'on est obligé d'intervenir énergiquement pour restituer une certaine autonomie à l'écosystème profondément dégradé. Enfin, les écologistes proposent le terme de réallocation lorsqu'on destine une part du paysage à un nouvel usage qui n'a pas de rapport intrinsèque avec l'écosystème dégradé (par exemple, la plantation d'eucalyptus dans une savane) (fig. 2).

Le terme de « réhabilitation » des écologistes correspond souvent aux termes de « *mine soils reclamation* » ou de « *soil restoration* » des pédologues, utilisés lorsqu'il s'agit d'intervenir énergiquement pour rétablir la capacité de production du sol. Il faudrait encore introduire une nuance, dans ce sens que les sols primitifs ne sont pas forcément très productifs (par exemple, les sols forestiers acides à haut niveau de R_2O_3 libres toxiques) : pour les pédologues, la restauration des sols est une intervention naturelle (la jachère, par exemple) aboutissant avec le temps à l'amélioration des propriétés liées à leur productivité. Dans les articles qui suivent, l'homme est intervenu artificiellement pour relancer le fonctionnement hydrique des vertisols « hardés » et des « zipellés » du Burkina, pour reconstituer un complexe argilo-humique sur les cendres volcaniques du Salvador ou pour réduire la toxicité aluminique dépendante du pH des vieux sols ferrallitiques du Bénin, du Rwanda et du Burundi : il s'agit donc de réhabilitation ou d'amélioration foncière si on crée les conditions biologiques et physico-chimiques qui améliorent la croissance des plantes. Cependant, on peut augmenter la production végétale en améliorant la nutrition des plantes sans pour autant modifier significativement la composition chimique du sol, ni réduire ses carences minérales : c'est le cas de l'apport de fumier, dans la pratique du zaï au Burkina, ou sur les sols ferrugineux sableux de Mbissiri (Cameroun), qui améliore nettement la production végétale sans modifier la teneur en carbone du sol, ni sa résistance à l'érosion.

Les pédologues ont souvent présenté les sols comme une ressource non renouvelable. Certes, il est des circonstances (comme pour les sols superficiels sur roches dures) où il n'est pas possible (ou pas rentable), à l'échelle d'une génération, de réintroduire une couverture végétale sur ces paysages décapés. Le premier objectif de ce numéro est de montrer que, en dehors des longs processus de restauration des sols par la jachère, il existe diverses techniques plus ou moins complexes qui permettent d'abord de restaurer la productivité des terres en un ou deux ans, puis d'améliorer progressivement les composantes du sol liées à la fertilité.

C'est le cas :

— de l'apport de fumier de poule et de feuilles de *Gliricidia sepium* sur les cendres volcaniques du Salvador (COLLINET et MAZARIEGO) ;

— de la « roturación », du terrassement, de la fertilisation et de la rotation (blé-maïs-fève-haricot) sur les cendres indurées du Mexique (QUANTIN, PRAT, ZEBROWSKI) et de l'Équateur (DE NONI et VIENNOT) ;

— de la jachère courte de *Mucuna* sur les sols ferrallitiques acides du Bénin (AZONTONDE) ;

— du buttage cloisonné des vertisols dégradés (hardés) du Nord-Cameroun (MASSE *et al.*) ;

— du fumier de chèvre sur les sols ferrugineux sableux labourés du Nord-Cameroun (BOLI *et al.*) ;

— du zaï, du fumier et du complément minéral sur les sols dégradés (zipellés) du Burkina (ROOSE *et al.*) ;

— du fumier, du paillage, de la chaux et du complément minéral sur les sols ferrallitiques acides du Rwanda (ROOSE, NDAYIZIGIYE, SEKAYANGE) et du Burundi (RISHIRUMUHIRWA).

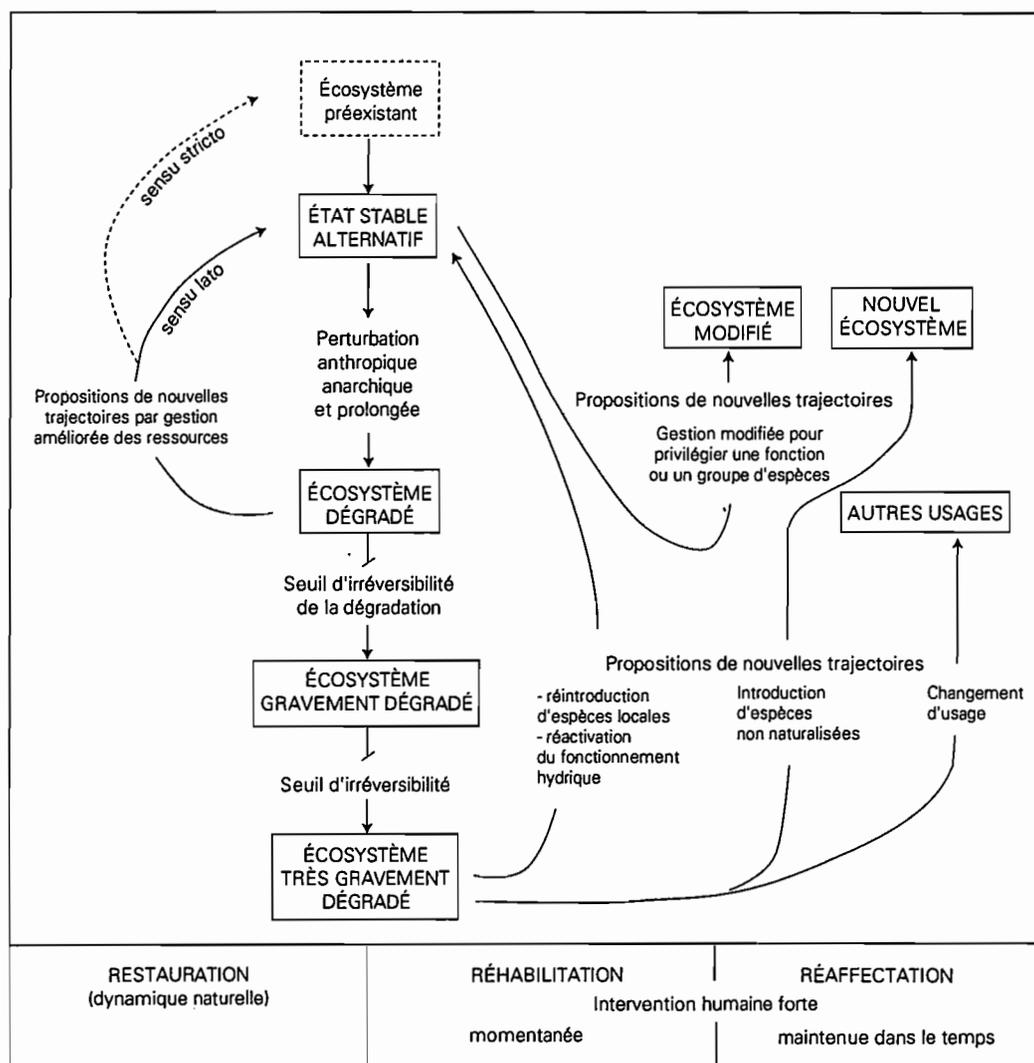


FIG. 2. — Modèle général décrivant la dégradation des écosystèmes et les trois voies majeures envisagées pour y remédier. D'après ARONSON *et al.*, 1993.

*General scheme describing ecosystems degradation and the three main ways considered to solve the problems. After ARONSON *et al.*, 1993.*

Expérimentations sur la stratégie de GCES dans diverses conditions écologiques

Le deuxième objectif de ces *Cahiers* est de montrer que, en combinant la gestion de l'eau, de la matière organique

et des nutriments indispensables pour la croissance optimale des cultures, on peut à la fois réduire les risques érosifs et améliorer substantiellement la productivité des terres et du travail. Cet exercice complexe a été tenté dans des milieux très divers :

— sur les collines d'Haïti, en intensifiant la production végétale grâce à des citernes collectant le ruissellement sur les pistes rurales, grâce à des haies vives et à des techniques culturales améliorées (SMOLIKOWSKI) ;

— dans les cerrados du Brésil, en sélectionnant les techniques de semis direct (BLANCANEUX *et al.*) ;

— dans les montagnes de l'Équateur, en combinant la fertilisation, les rotations et des structures antiérosives perméables (DE NONI et VIENNOT) ;

— dans quatorze sites montagneux méditerranéens en Algérie du Nord-Ouest, en améliorant les techniques culturales et les cultures associées (ROOSE, ARABI *et al.*) ;

— dans les blocs de culture de coton du Nord-Cameroun, en associant le travail du sol et les litières, la fertilisation organique et minérale, le paillage et les haies vives (BOLI, *et al.*) ;

— dans les montagnes de l'Ouest-Cameroun, en conjuguant les haies, le bocage et les techniques culturales (FOTSING) ;

— dans les collines du Rwanda, en combinant les haies vives de légumineuses arborescentes au fumier, au paillage et aux compléments minéraux NPK et Ca (ROOSE, NDAYIZIGIYE, SEKAYANGE) ;

— dans les collines du Burundi en optimisant la gestion de la biomasse dans la bananeraie, du fumier et des compléments minéraux NPKCa (RISHIRUMUHIRWA) ;

— dans la zone soudano-sahélienne du Burkina, en analysant les limites des aménagements de terroir basés sur la construction de cordons de pierres ou de haies vives, les techniques culturales, la fertilisation organique et son complément minéral (DUGUÉ *et al.*).

La dynamique de l'eau et l'érosion sur les versants

De nombreuses études ont abordé les problèmes posés par l'érosion en nappe sur des pentes modérées. Bien qu'on ait décrit l'existence en montagne d'autres processus plus actifs (ravinement, glissement de terrain, érosion mécanique sèche consécutive aux travaux culturaux), peu d'études dépassent le stade de la typologie, de la morphologie et de la cartographie des processus. Comme la modélisation sur la base des processus physiques, lancée il y a vingt ans, n'a pas encore donné de résultats satisfaisants ni applicables à grande échelle, on continue à évaluer les risques d'érosion des grands bassins versants à l'aide de SIG, de vues aériennes... et des facteurs de l'équation de perte en terre de WISCHMEIER et SMITH (1960, 1978)

(USLE plus ou moins révisée), laquelle n'a été prévue que pour l'érosion en nappe et en rigole.

À la fin de ce numéro, deux notes techniques décrivent des méthodes simples permettant d'aborder l'analyse de la capacité d'infiltration (monocylindre), de la circulation des eaux dans le profil pédologique (*subsurface flow*) et sur le versant (simulateur de ruissellement).

CONCLUSION

Si les problèmes d'érosion, de dégradation et de restauration de la fertilité des sols sont anciens, la recherche scientifique dans ce domaine est très récente (60 ans !).

La majorité des études concerne l'érosion en nappe due à la battance des pluies sur des pentes modérées. Cependant, en région tropicale, des populations nombreuses cultivent des versants très raides ; les processus de naissance du ruissellement et d'érosion y sont très différents et mériteraient des études approfondies permettant la modélisation des facteurs déterminants et le développement d'une lutte antiérosive moins empirique.

Contrairement à ce qu'on a cru longtemps, la résolution des problèmes de lutte antiérosive se heurte, outre le refus par les « bénéficiaires » des techniques imposées par les technocrates, à la nécessaire adaptation des techniques de lutte aux processus divers et aux conditions socio-économiques qui prévalent localement. Des progrès techniques sont encore nécessaires pour définir l'efficacité et les limites d'utilisation de ces techniques et pour mieux prévoir les risques de ruissellement et d'érosion avant que les sols ne soient trop dégradés.

Des succès récents, bien que localisés et partiels, donnent enfin l'espoir que le monde ne marche pas fatalement à la catastrophe à cause d'une croissance démographique sans précédent historique. Il n'est plus temps de « conserver les sols » : il faut d'urgence intensifier la productivité de la terre et du travail.

Devant la diversité des problèmes posés, se dessine un large champ de recherche axé sur l'adaptation des techniques de gestion durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité du sol aux conditions écologiques et humaines. Avec une approche participative (la GCES), s'appuyant d'abord sur les méthodes traditionnelles améliorées et, si nécessaire, sur les techniques mécaniques plus sophistiquées, il est possible d'améliorer sérieusement l'efficacité de la lutte antiérosive et de réhabiliter la productivité des sols dégradés, en attendant la stabilisation de la population.

BIBLIOGRAPHIE

- ARONSON (J.), FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), OVALLE (C.), PONTANIER (R.), 1993 — Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1 (1) : 8-17.
- BENNET (H. H.), 1939 — *Elements of soil conservation*. New York, Mac Graw-Hill.
- BOLI (Z.), 1996 — *Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord-Cameroun (Mbissiri)*. Thèse doct., sciences de la Terre, univ. Dijon/Orstom/Ira, 345 p.
- CRITCHLEY (W.), REIJ (C.), SEZNEC (A.), 1992 — *Water harvesting for plant production. Part II. Case studies and conclusion for Sub-Sahara Africa*. Washington, World Bank, Technical paper, 120 p.
- ELLISON (W. D.), 1944 — Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.*, 25 : 131-181.
- GRÉCO (J.), 1978 — *La défense des sols contre l'érosion*. Paris, La Maison Rustique, 183 p.
- HEUSCH (B.), 1986 — Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 153-162.
- HUDSON (N. W.), 1991 — Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bull.*, 64, 65 p.
- HUDSON (N. W.), 1992 — *Land husbandry*. London, Batsford, 192 p.
- KLEIN (H. D.), 1994 — *Introduction des légumineuses dans la rotation céréales-cotonnier au Nord-Cameroun : gestion et utilisation*. Maisons-Alfort, Cirad-EMVT, 184 p.
- LAL (R.), 1976 — *Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control*. Ibadan, IITA, Monograph 1, 208 p.
- LILIN (C.), 1986 — Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 139-146.
- LOVEJOY (J. B.), NAPIER (T.), 1976 — Conserving soil : sociological insights. *J. Soil and Water Conservation*, 415 : 304-410.
- LOWDERMILK (W. C.), 1953 — Conquest of the land through 7 000 years. *Agric. Information Bull.* (USDA, SCS), 99.
- MONJAUZE (A.), 1962 — *Rénovation rurale : rôle et dispositif d'infiltration*. Alger, Délégation générale, département des Forêts, service de DRS, 16 p.
- PLANCHON (O.), 1991 — *Étude spatialisée des écoulements sur les versants et leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire)*. Paris, Orstom, 340 p.
- PLANTIÉ (I.), 1961 — *Technique franco-algérienne des banquettes de DRS*. Oran, Délégation générale, département des Forêts, service de DRS, 22 p.
- PUTOD (R.), 1956 — La protection des vignes contre l'érosion. *Rev. Agron. Afrique du Nord*, 1992 : 567-576.
- ROOSE (E.), 1973 — *Dix-sept années de mesure de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. Thèse doct.-ing., fac. Sciences, Abidjan, 125 p.
- ROOSE (E.), 1977 — *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 78, 105 p.
- ROOSE (E.), 1987 — « Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale ». In : *Compte rendu du séminaire Icrisat/Inran*, Niamey, Niger : 57-72.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol.* FAO, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), KABORE (V.), GUENAT (Cl.), 1994 — « Le zaï, une technique traditionnelle africaine de réhabilitation des terres dégradées de la région soudano-sahélienne (Burkina Faso) ». In Pontanier (R.), M'Hirit, Akrimi, Aronson, Le Floch, éd. : *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?* Paris, J. Libbey Eurotext : 249-265.
- ROOSE (E.), SARRAILH (J. M.), 1989-1990 — Érodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1) : 7-30.
- SÉGUY (L.), BOUZINAC (S.), 1995 — *Modélisation et mise en pratique de systèmes de culture mécanisés*. Programme Zap/ Cirad-CA, n° 20, 47 p.
- SHAXSON (T. F.), HUDSON (N. W.), SANDERS (D. W.), ROOSE (E. J.), MOLDENHAUER (W. C.), 1989 — *Land husbandry : a framework for soil and water conservation*. Ankeny (Iowa), Soil and Water Conservation Society, WASWC, 64 p.
- STALLINGS (J. H.), 1953 — Continuous plant cover : the key to soil and water conservation. *J. Soil and Water Cons.*, 8 : 63-68.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1960 — « A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning ». In : *7th Congress ISSS 1* : 418-425.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1978 — *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Washington, USDA, Agriculture Handbook n° 537, 58 p.

SYNOPSIS DE L'ÉVOLUTION DES CONNAISSANCES SUR LA LUTTE ANTIÉROSIVE

- 2000	Asie	Invention des terrasses en gradins irrigués.
+ 1000	Crète	Terrasses méditerranéennes avec murs de pierres sèches.
> 1400	Pérou	Terrasses avec murs de pierres taillées plus sol reconstitué.
1850	France	RTM : reforestation et correction torrentielle dans les Alpes et les Pyrénées.
1889	Allemagne	Premières parcelles de mesure de l'érosion.
1930	USA	CES : invention des terrasses de diversion (Bennet).
1940-1980	Maghreb	DRS, mariage de la RTM et de la CES : reforestation et diverses banquettes dans le bassin méditerranéen.
1944	USA	« Effet splash » : étude de la battance des gouttes de pluie sur la structure de l'horizon superficiel et de l'impact sur le ruissellement (Ellison).
1954-1991	Afrique	Extension d'un réseau de parcelles d'érosion en zone tropicale : évaluation de l'érosion sous diverses cultures (Fournier, Bailly, Charreau, Fauck, Roose).
1958-1978	USA	USLE : premier modèle de prévision des risques de pertes en terre en fonction de l'agressivité des pluies et de la résistance du milieu (Wischmeier et Smith).
1960	Rhodésie	Hudson démontre que l'intensification des cultures réduit les risques d'érosion en augmentant le couvert végétal.
1965	USA	Meyer, Swanson... mettent au point des simulateurs de pluie.
1972	Maroc	Heusch démontre que, sur les vertisols, le ruissellement et l'érosion sont plus forts en bas de pente (sur pente faible saturée) qu'en haut de pente (pente forte).
1973-1980	Côte d'Ivoire	Roose montre que, sur les sols ferrallitiques, le ruissellement décroît lorsque la pente augmente, mais l'érosion augmente. Les sols tropicaux sont plus résistants à la battance que prévu.
1960-1981	France	Théorie des aires contributives au ruissellement (Cappus, Riddle, Cosandey).
1987	Porto Rico	Séminaire sur les causes de l'échec de la CES et de la DRS. Proposition d'une nouvelle approche participative, <i>Land husbandry</i> (Shaxson <i>et al.</i>) et GCES (Roose).
1986-1994	Afrique	Nouvelle approche de la gestion des eaux de surface par dissipation de l'énergie du ruissellement en nappe (Roose) sur la rugosité de la surface du sol et les microbarrages perméables (Roose, Serpantié, Lamachère).
1988	Brésil	La matière organique, bon indicateur du degré d'érosion d'un sol (Leprun).
1989	Afrique	Modélisation du ruissellement en zone sahélienne à partir des états de surface (Casenave et Valentin).
1989	Côte d'Ivoire	Discontinuité du ruissellement sur les versants (Planchon).
1990-1995	Tropiques	Diverses techniques de restauration des sols : le zaï au Burkina (Roose <i>et al.</i>), les haies vives plus les fertilisants au Rwanda (Ndayizigiye), le fumier et le travail du sol au Cameroun (Boli <i>et al.</i> , Pontanier <i>et al.</i>), au Mexique (Quantin <i>et al.</i>), au Salvador (Collinet), en Équateur (De Noni <i>et al.</i>).

La réhabilitation des sols
Soil rehabilitation

Photo E. Roose



La réhabilitation de la capacité de production des sols ferrugineux tropicaux au Yatenga (Burkina Faso) s'effectue par la mise en place d'un système de gestion des eaux (gauffrage de la surface du sol ou cordons de pierres), des matières organiques (enfouissement localisé de compost ou paillage) et par le travail localisé du sol. Ces apports minimes font plus d'effets sur la culture que sur le sol lui-même.

Le zaï

Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso)

Éric ROOSE (1), Vincent KABORE (2) et Claire GUENAT (2)

(1) Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés (LCSC), centre Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex, France.
(2) Laboratoire des sols (IATE), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse.

RÉSUMÉ

Dans la zone soudano-sahélienne semi-aride, les techniques conventionnelles de réhabilitation des terres sont limitées et coûteuses. Il nous a donc paru intéressant d'étudier en détail le « zaï », une pratique traditionnelle mossi de récupération des terres dégradées par la culture ou le surpâturage, et de tester quelques améliorations des pratiques du zaï sur la production de sorgho (grain et biomasse) et sur la diversité des herbes (vingt-trois espèces) et arbustes fourragers (treize espèces) qu'elle permet de réintroduire progressivement. Le zaï est un système complexe de restauration de la productivité des terres faisant appel à un apport localisé de matières organiques, aux termites pour perforer la croûte de battance, à la capture des limons éoliens, à l'infiltration localisée du ruissellement, au travail profond du sol et à la culture en poquet du mil ou du sorgho, suivant que les sols sont perméables ou limono-argileux.

Des enquêtes au nord-ouest du Burkina ont montré l'intérêt, les limites (pluies de 400 à 800 mm/an) et la diversité des pratiques du zaï en fonction de la texture du sol et de la disponibilité en fumure organique et en main-d'œuvre.

L'expérimentation pendant deux ans sur deux sols de potentialités nettement différentes (sol ferrugineux tropical superficiel et sol brun profond) a permis de comprendre l'importance de la réserve hydrique et du travail du sol, ainsi que des apports d'eau et d'éléments fertilisants, organiques et minéraux. Par rapport à la technique traditionnelle, l'amélioration du zaï a également permis d'augmenter substantiellement la production en grain (de 150 à 1 700 kg/ha) et en paille (de 500 à 5 300 kg/ha) sur un sol brun profond, et de réintroduire une grande diversité de plantes utiles pour relancer les processus naturels de restauration des sols par la jachère. Mais, si la pratique du zaï a augmenté la production de biomasse, on n'a pu déceler aucune variation significative des propriétés liées généralement à la fertilité des sols (pH, matière organique, cations échangeables, P et N) au bout de deux années d'expérimentation. Paradoxalement, la restauration de la productivité du sol et la réhabilitation de la couverture végétale seraient donc plus rapides que la restauration des caractéristiques physico-chimiques du sol.

MOTS CLÉS : Afrique — Zone soudano-sahélienne semi-aride — Restauration des sols dégradés — Réhabilitation du couvert végétal arbustif — Pratique paysanne : fonctionnement, améliorations, limites — Production de biomasse — Activité des termites.

ABSTRACT

THE ZAÏ: FUNCTIONING, LIMITS AND IMPROVEMENT OF A TRADITIONAL AFRICAN PRACTICE FOR THE REHABILITATION OF DEGRADED LANDS IN SEMI-ARID AREAS (BURKINA FASO)

The authors describe a complex soil restoration system, named "zaï", which was studied in detail during their inquiries and experiments and tested in two situations (a superficial, poor alfisol and a deep brown tropical soil) during two years. Biomass production of sorghum is reported in relation to various improved zaï systems and also the wild grass and shrub species which appeared after 2 years of zaï cropping on a bare crusted degraded soil surface. For degraded soil productivity restoration and their green cover rehabilitation, it could be interesting to study and improve traditional systems, especially in Sudano-Sahelian areas where technical possibilities are limited. Such is the case of the zaï practice, a complex soil restoration system, using organic matter localization, termites boring channels in the crusted soils, runoff capture in micro-watersheds, seed hole cropping of sorghum in heavy soils or millet on sandy soils. This system might be useful not only to restore soil productivity but also to revegetate bare crusted surface by the seeds of 23 species of weeds and 13 species of forage shrubs included in dry dung manure (3 t/ha/year).

Investigations in many fields of the Mossi Plateau (northern region of Burkina) showed a range of variations in the zaï practice in relation to soil texture and labour and organic matter availability and its significance for agroforestry rehabilitation of these degraded crusted soils of the semi-arid area.

Experimental improvements of this zaï system on two soils confirmed the possibility not only to increase substantially the production of cereals grains (from 150 to 1,700 kg/ha/year) and straw (from 500 to 5,300 kg/ha/year) on deep brown soils, but also to reintroduce a great diversity of useful plants which might help the following processes of degraded soil restoration. The zaï practice increased substantially the biomass production without any significant change in soil properties after a 2 years experimentation. Paradoxically, the restoration of soil productivity seems to be more rapid than the improvement of soil fertility characteristics.

KEYWORDS : Africa — Semi-arid area — Soil restoration — Bush cover rehabilitation — Biomass production — Termite activity — Functioning, limits, improvements of traditional practice.

RESUMEN

EL ZAÏ : FUNCIONAMIENTO, LIMITACIONES Y MEJORAS DE UNA PRÁCTICA TRADICIONAL AFRICANA DE REHABILITACIÓN DE LA VEGETACIÓN Y DE LA PRODUCTIVIDAD DE LAS TIERRAS DEGRADADAS DE LA REGIÓN SUDANO-SAHELIANA (BURKINA FASO)

En la zona sudano-saheliana semi-árida, las técnicas convencionales de rehabilitación de las tierras son limitadas y costosas. Nos ha parecido interesante de estudiar detalladamente el « zaï », una práctica tradicional de recuperación de tierras degradadas por el cultivo o el sobrepastoreo, y probar algunas mejoras en la producción de sorgo (grano y biomasa) y en la diversidad de las hierbas (23 especies) y arbustos forrajeros (13 especies) que permite reintroducir progresivamente. El zaï es un sistema complejo de restauración de la productividad de las tierras, que utiliza las materias orgánicas localizadas, los termites para perforar la incrustación superficial, los limos eólicos capturados, la infiltración localizada de la arrollada, el trabajo profundo y el cultivo del mijo sobre el suelo permeable o del sorgo sobre tierras pesadas.

Las encuestas en el noroeste de Burkina han mostrado el interés, los límites (annual lluvias comprendidas entre 300 y 800 mm) y la diversidad de las prácticas del zaï con arreglo a la textura del suelo, y a la disponibilidad de abonados orgánicos y de mano de obra. La experimentación conducida durante dos años sobre dos suelos de potencialidades son netamente diferentes (suelo ferruginoso tropical superficial y suelo pardo profundo) ha permitido comprender la importancia de la reserva hídrica y del trabajo del suelo, los aportes de agua y de fertilizantes orgánicos y minerales. La mejora del zaï ha permitido aumentar sistemáticamente la producción de granos (de 150 a 1 700 kg/ha/año) y de paja (de 500 a 5 300 kg/ha/año) sobre el suelo pardo profundo y de reintroducir una gran diversidad de plantas utilizadas para reactivar los procesos naturales de restauración de suelos por el barbecho. Aunque si la concentración de las aguas de arrollo, el aporte de materias orgánicas y de nutrientes minerales complementarios en la depresión del zaï han aumentado la producción de biomasa, no se ha podido detectar una variación significativa de las propiedades de los suelos al cabo de dos años de experimentación.

PALABRAS CLAVES : África — Zona semi-árida — Práctica tradicional — Restauración de suelos — Rehabilitación de la cobertura arbustiva — Actividades de termites — Producción de biomasa — Limitaciones, mejoras, funcionamiento de las prácticas tradicionales.

INTRODUCTION

La restauration de la productivité des sols et la réhabilitation du couvert végétal sont des enjeux vitaux pour les populations paysannes de la zone soudano-sahélienne (fig. 1). Depuis un demi-siècle, de nombreux programmes de conservation des sols se sont succédé en Afrique, sur la base de solutions importées des régions tempérées, généralement mal adaptées aux conditions écologiques ou socio-économiques tropicales. Or, l'introduction des recettes des pays industrialisés, bien souvent au mépris du « savoir-faire » des populations locales, se heurte non seulement à des difficultés techniques d'adaptation mais aussi à des obstacles culturels qui conduisent les « bénéficiai-

res » au rejet des méthodes classiques de conservation des sols (CES et DRS). Le cas du programme du Groupe européen de restauration des sols (Geres) au Burkina, dans la province du Yatenga, en est un exemple bien connu (MARCHAL, 1983).

Des études récentes ont montré l'échec de ces méthodes modernes conventionnelles. Aussi la réactualisation de pratiques ancestrales pourrait-elle représenter, dans le domaine de la gestion durable des eaux et de la fertilité des sols, une approche intéressante dans la mesure où leurs limites sont analysées scientifiquement, les pratiques améliorées et adaptées en fonction de l'évolution démographique et socio-économique des régions concernées (HUDSON, 1992 ; CRITCHLEY *et al.*, 1992 ; ROOSE, 1994).

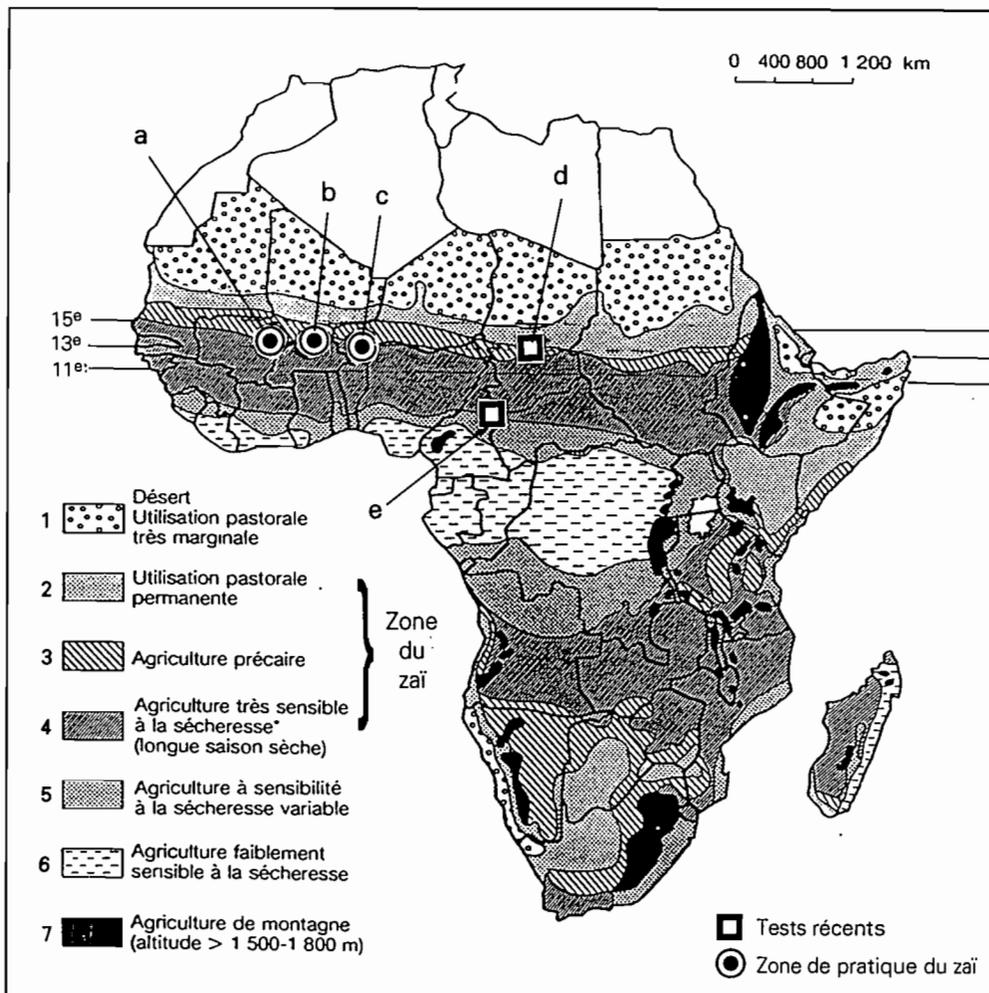


FIG. 1. — Les grandes zones agroclimatiques de l'Afrique (d'après l'ILTA, cité par PIERI, 1989). Les zones les plus propices à la technique du zaï sont situées en région semi-aride soudano-sahélienne à agriculture précaire (3), à agriculture très sensible à la sécheresse (4), et peut-être dans la zone sahéenne à utilisation pastorale (2). Les zones concernées par les recherches en cours sont également situées (a : Yatenga au Burkina ; b : pays dogon au Mali ; c : vallée de Keita au Niger ; d : monts Guera au Tchad (AICF près de Bitkine) ; e : Mbissiri au Sud-Est-Bénoué, Nord-Cameroun (Ira/Orstom). Enfin, on peut observer l'extension possible de l'application de cette pratique de restauration des sols en Afrique (parties hachurées nos 2, 3 et 4).

Geographical situation of zaï concerned areas in Africa. Position of trials and observations. Possible extension in Africa.

Le « zaï » est un système complexe de restauration de la productivité des sols dégradés, une forme particulière de culture en poquet, concentrant les eaux de ruissellement et les matières organiques dans des microbassins. Cette pratique traditionnelle pourrait constituer une solution simple pour restaurer la productivité des « zipellés », sols encroûtés, tassés et blanchis par la battance des pluies et décapés par le ruissellement, littéralement « désertifiés », alors qu'il pleut 400 à 800 mm par an dans cette zone soudano-sahélienne ! En outre, elle permet de réhabiliter la couverture agroforestière de cette région semi-aride (ROOSE *et al.*, 1992 ; REIJ, 1994).

Nos travaux de recherche portent sur cette technique traditionnelle de récupération des terres, réapparue au Yatenga dans les années 1980 à la suite des périodes de sécheresse où les précipitations annuelles ont diminué de 30 % dans l'ensemble du Sahel (WRIGHT, 1982 ; BAGRE, 1988).

Dans cet article, nous rappellerons d'abord les causes de la dégradation de la productivité de ces sols cultivés et les moyens de les récupérer lentement par la jachère ou rapidement par des interventions complexes. Puis nous analyserons le milieu où l'on observe les zipellés, terres dégradées que les paysans mossis tentent de récupérer quand ils n'ont plus assez de terres pour survivre avec leurs troupeaux. Nous décrirons ensuite les pratiques complexes du zaï, dévoilées progressivement par les paysans au cours de nos enquêtes. Enfin, nous discuterons des résultats des expériences sur l'amélioration du zaï et ses effets sur l'augmentation de la production de sorgho (grain et paille) et sur la réhabilitation de la végétation herbacée et buissonnante, après deux années de culture en zaï sur deux sols de potentialités très différentes.

LES CAUSES DE LA DÉGRADATION DES SOLS CULTIVÉS ET LES MOYENS DE LES RÉCUPÉRER

Dans la zone soudano-sahélienne, la dégradation de la productivité des sols provient du déséquilibre du bilan des matières organiques et minérales induit par les feux répétés, le surpâturage, le défrichement et les travaux culturels. Ce déséquilibre est encore accéléré par l'érosion (ROOSE, 1980 ; BREMAN et UITHOL, 1986). La culture et le pâturage entraînent une simplification de l'écosystème et de la biodiversité, une réduction de la restitution des litières au sol et, par conséquent, une diminution des teneurs en matière organique du sol et des activités biologiques (en particulier de la mésofaune), et une dégradation de la structure des horizons superficiels. Il s'ensuit une augmentation des risques de ruissellement, d'érosion et de lixiviation des nutriments qui, à leur tour, accélèrent le désé-

quilibre et la dégradation. La réduction de la capacité du sol à stocker l'eau et les nutriments entraîne la baisse de rentabilité des travaux culturels devenus indispensables pour maintenir une porosité favorable à l'enracinement des cultures et pour lutter contre les adventices ; les sols épuisés sont abandonnés à la jachère.

Nombreux sont les pédologues qui pensent que les sols sont une ressource non renouvelable. En effet, il faut 100 000 ans pour altérer un mètre de granite tandis qu'il suffit d'un siècle pour l'éroder. C'est pourquoi les sols peu épais sur roches dures ou sur cuirasse ne sont plus récupérables à l'échelle humaine, une fois décapé l'horizon superficiel. De même, en zones arides, la restauration de la fertilité des sols est très lente car la production de biomasse et les activités biologiques sont faibles.

Cependant, il existe en région tropicale des sols profonds, mais encroûtés, qui ont perdu leurs horizons humifères, sont exposés à l'ardeur du soleil et à la battance des pluies, et sur lesquels rien ne pousse. C'est le cas des « zipellés » du Burkina, des « hardés » du Nord-Cameroun, des « naga » du Tchad, etc. Le mode traditionnel de restauration des sols par la jachère est très long : dix ans pour récupérer la fertilité initiale médiocre des sols sous les tropiques humides, trente à cinquante ans en zone soudanienne et plus encore en zone sahélienne (ROOSE, 1993).

De récentes expériences de terrain ont montré qu'il existe une voie rapide de restauration de la productivité des sols cultivés, qui exige la correction simultanée des principales déficiences des sols dégradés (ROOSE, 1994) :

- maîtriser le ruissellement et l'érosion, sans quoi les nutriments ne peuvent s'accumuler ;
- travailler profondément le sol pour restaurer un enracinement puissant des cultures ;
- stabiliser la structure en enfouissant des matières organiques, de la chaux ou du gypse ;
- revitaliser la couche superficielle du sol par apport de fumier ou de compost fermenté (plus de 3 t/ha) ;
- supprimer la toxicité aluminique et rétablir un pH supérieur à 5 en apportant du fumier et des cendres (des roches basiques broyées, du gypse ou de la chaux selon la disponibilité) ;
- corriger les principales carences du sol ou tout au moins fournir aux cultures les compléments minéraux indispensables pour une production optimale de biomasse.

La correction de l'ensemble des déficiences des sols dégradés permet une augmentation rapide de la production (en un à deux ans) et une lente amélioration du sol. Mais l'omission de l'une de ces règles entraîne un ralentissement de la restauration de la production de biomasse. Nous le verrons dans l'étude qui suit.

LE CONTEXTE DE L'ÉTUDE DE LA RESTAURATION DES ZIPELLÉS

Les recherches se sont déroulées dans les provinces du Yatenga et du Passoré situées au nord-ouest du Burkina (14° de latitude nord). Le climat soudano-sahélien est marqué par une longue saison sèche dont l'aridité est accentuée par l'harmattan, un vent sec soufflant du Sahara. La courte saison des pluies (quatre mois) connaît de fortes variations dans le temps et dans l'espace. Durant les vingt dernières années, les pluies annuelles (400 à 700 mm) ont diminué de 30 % par rapport aux années 1960. L'évapotranspiration potentielle dépasse 2 000 mm : même en sai-

son humide, les pluies peuvent manquer pendant deux à trois semaines. La répartition des pluies a presque autant d'importance que leur abondance pour la production des cultures.

La région (fig. 2) présente une surface ondulée dominée par des collines et des buttes cuirassées, un court escarpement de blocs et un long glacis à pente faible (1 à 3 %), d'abord gravillonnaire, puis sablo-limoneux sur carapace, enfin limono-argileux dans les bas-fonds très évasés. La succession « butte-glacis-bas-fond » contrôle la répartition des sols, de la végétation et l'utilisation de l'espace par l'homme.

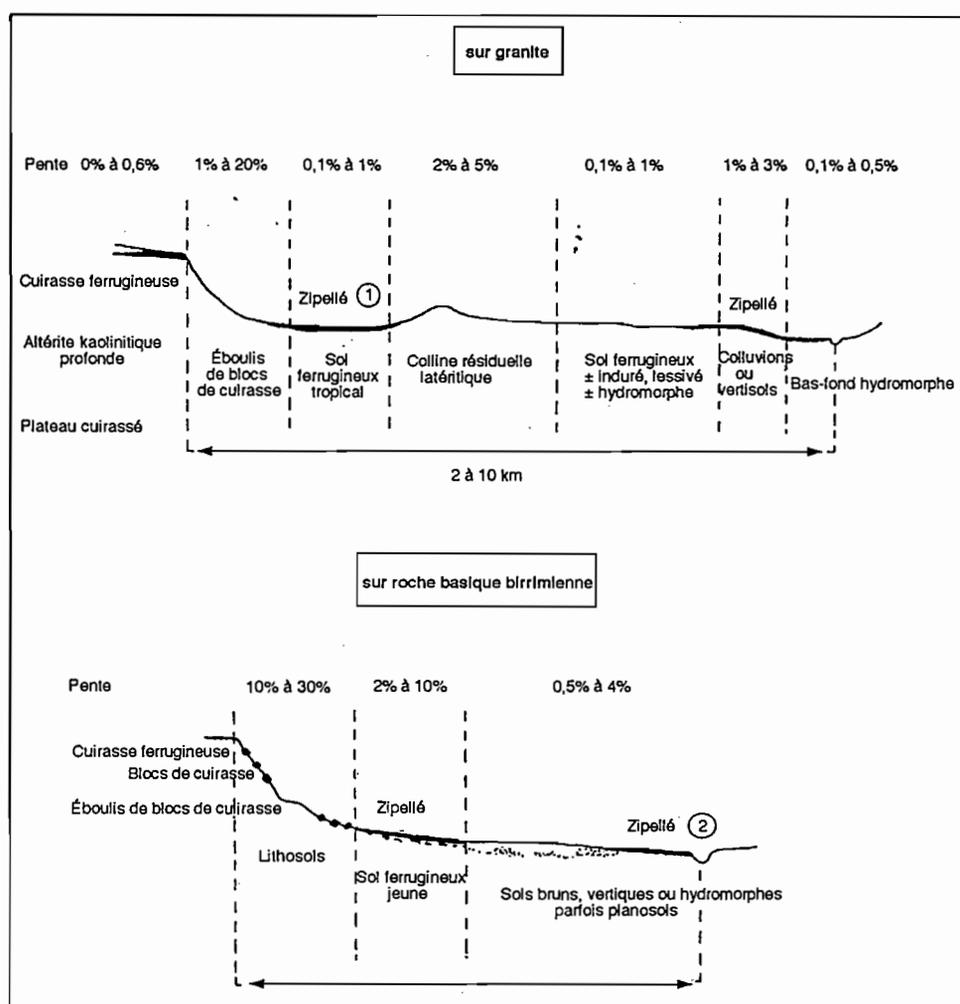


FIG. 2. — Toposéquences de sols typiques du plateau mossi au nord-ouest du Burkina. Localisation des zipellés sur la toposéquence de Pouyango (granite) et de Taonsongo (roche basique birrimienne).

Typical soil catenas of the Mossi plateau (Burkina). Positions of soil restoration trials of Pouyango (1) and Taonsongo (2).

Les sols de la zone ont été étudiés par BOULET (1976) et MARCHAL (1983). On distingue (fig. 2) :

- les sols minéraux bruts qui occupent les sommets des collines, les affleurements cuirassés et les parties supérieures des hauts glacis ;

- les sols ferrugineux tropicaux lessivés et indurés qui couvrent de vastes surfaces sur les glacis ;

- les sols hydromorphes dans les bas-fonds, peu étendus (moins de 10 %) ;

- les sols bruns tropicaux (deuxième toposéquence) qui se sont développés sur des matériaux argileux hérités de l'altération des roches vertes ferro-magnésiennes, également peu répandus.

Les sols ferrugineux, les plus cultivés, présentent de sévères limitations pour leur mise en valeur (ROOSE *et al.*, 1979 ; PIERI, 1989) :

- mauvaise stabilité structurale et forte érodibilité liées à leur richesse en limons et sables fins et à leur pauvreté en matière organique ;

- faible teneur en azote, phosphore et potassium ;

- faible capacité d'échange cationique et tendance à l'acidification ;

- profondeur exploitable souvent limitée par une cuirasse ferrugineuse ;

- faible réserve en eau utile, surtout sur les sols gravillonnaires (inférieure à 60 mm par mètre de profondeur). Malgré la diminution récente de la pluviosité, la pression foncière est telle que les cultures ont tendance à s'étendre jusque sur les sols gravillonnaires du sommet de la toposéquence.

Sur la figure 2, on peut noter la présence de zipellés sur l'ensemble de la toposéquence. À l'origine, il s'agit de sols limoneux dégradés, encroûtés et blanchis par érosion sélective en nappe. Suite à l'extension des surfaces cultivées, on trouve aujourd'hui des « zipellés rouges » sur le glacis gravillonnaire, des « zipellés blancs » sur les glacis limoneux et des « zipellés de bas de versant », encroûtés par sédimentation lors des inondations (MIETTON, 1988).

La capacité d'investissement des unités d'exploitation agricole est très réduite. La pénurie de main-d'œuvre s'est encore aggravée ces dernières années du fait de la migration des hommes valides de 20 à 40 ans (plus de 40 % sont partis ; BILLAZ, 1980), mais aussi en raison des sites aurifères qui mobilisent la main-d'œuvre en saison sèche au détriment des aménagements fonciers. Par ailleurs, les spéculations végétales restent marginales et ne constituent pas des cultures de rente : céréales, arachide, niébé (haricot noir) et sésame sont en majeure partie autoconsommés tandis que la culture de coton a pratiquement disparu en faveur des zones plus humides (DUGUÉ, 1989). Le processus de capitalisation repose essentiellement sur l'élevage et les revenus des migrants de moyenne durée (un à trois ans). Ces faibles ressources monétaires sont gardées en réserve pour l'achat de céréales de subsistance, afin de

compenser le déficit des mauvaises saisons. Les possibilités d'investissement foncier dans le secteur agricole sont donc très limitées, d'autant plus que cet investissement est risqué (sécheresse, prédateurs, mortalité du bétail, etc.) et peu rentable aux yeux des migrants (DUGUÉ, 1989). L'agriculture est donc orientée presque exclusivement vers la production céréalière extensive de subsistance familiale.

DESCRIPTION DES PRATIQUES DU ZAÏ : LE RÉSULTAT DES ENQUÊTES

Par les enquêtes et l'expérimentation, nous avons tenté de comprendre le fonctionnement d'une pratique traditionnelle, les raisons de ses variantes et de leur extension dans la zone semi-aride, ainsi que de leur réussite sur les plateaux mossi (Burkina) et dogon (Mali), dans la vallée de Keita (Niger), et de leur échec dans la zone soudanienne plus humide du Nord-Cameroun (engorgement du sol si la pluie dépasse 1 000 mm). L'analyse critique de ces pratiques devrait permettre de les améliorer, à l'aide de technologies modernes telles que la fertilisation minérale d'appoint et le compostage, les herbicides, les graines sélectionnées et la mécanisation des travaux les plus durs. Inversement, l'observation des pratiques traditionnelles peut nous aider à améliorer notre diagnostic sur l'environnement physique et humain (ROOSE, 1992).

En langue mooré, « zaï » vient du mot « zaïegré » qui signifie « se hâter pour préparer sa terre ». Il s'agit en effet de récupérer des terres abandonnées, dégradées par une succession de « cultures minières », désertifiées, décapées par l'érosion et tellement encroûtées que le ruissellement emporte les graines et les résidus organiques qui auraient pu réhabiliter la jachère. D'après MARCHAL (1986), ces terrains désertifiés, malgré 400 à 800 mm de pluie, se sont étendus de 11 % en vingt ans.

Le zaï aurait été utilisé jadis par les agriculteurs les moins nantis, ne disposant que de terres pauvres, de peu de bétail et de faibles moyens de production. Cette pratique exigeante en main-d'œuvre aurait été abandonnée à la suite de périodes de pluies abondantes (1950-1970), de l'éclatement des familles étendues, de la mécanisation de la préparation de nouveaux champs, de l'aménagement des bas-fonds, etc. (KABORE, 1995).

La méthode du zaï et sa variante agroforestière sont décrites en détail dans la figure 3 (ROOSE, 1994). Elle consiste à préparer très tôt dans la saison sèche une terre abandonnée, en creusant à la pioche, en quinconce, tous les 80 à 100 cm, des cuvettes de 20 à 40 cm de diamètre, 10 à 15 cm de profondeur, en rejetant la terre vers l'aval en croissant, pour capter les eaux de ruissellement. La surface non travaillée, encroûtée qui sert d'impluvium présente cinq à vingt-cinq fois la surface travaillée (WRIGHT, 1982 ; ROOSE et RODRIGUEZ, 1990). La taille des

Décembre à avril

- Creusement tous les 80 cm d'une cuvette Ø = 40 cm, H = 15 cm terre posée en croissant en aval.
- L'Harmattan apporte des sables et des matières organiques.

Avril à juin

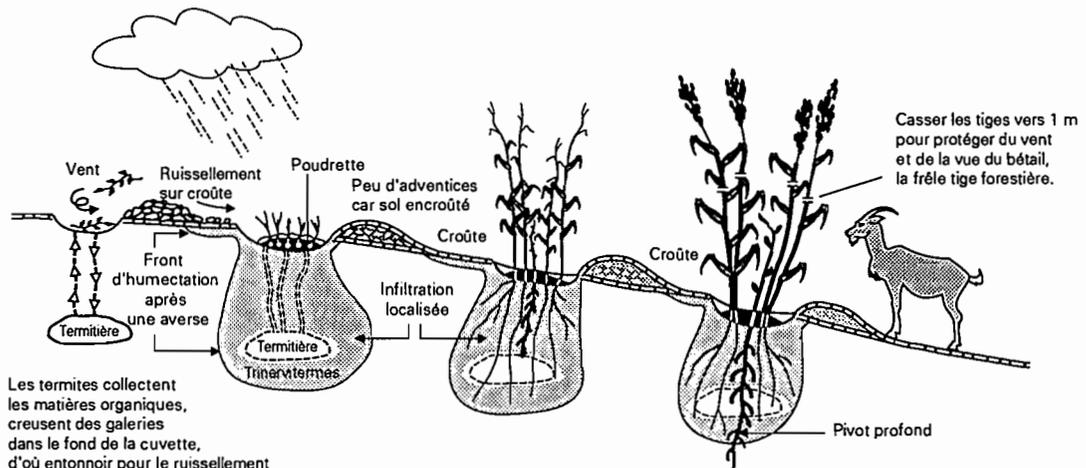
- Après la première pluie, apport de 2 poignées de poudrette (= 3 t / ha).
- Les termites y creusent des galeries enrobées d'excréments.
- Semis en poquet à la deuxième pluie.
- Eau infiltrée, stockée en profondeur à l'abri de l'évaporation directe.

Juin-juillet

- Démarrage de la saison des pluies.
- Levée précoce.
- Enracinement profond.
- Sarclage limité aux poquets.
- Germination de graines forestières.
- Concentration : de l'eau des nutriments.

Novembre

- Récolte : des panicules et du fourrage.
- Coupe des tiges vers 1 m : cache les tiges forestières de la vue du bétail. ralentit le vent desséchant et l'érosion éolienne.



- Zaï (en Moore) signifie : se hâter pour creuser en saison sèche le sol tassé et encroûté.
- Il permet de récupérer des terres abandonnées et de produire environ 800 kg / ha de grain dès la première année et d'entretenir la fertilité du sol sur plus de 30 ans.
- Il concentre l'eau et la fertilité sous le poquet et permet d'associer à la culture des arbres fourragers bien adaptés (agroforesterie).
- Limites : la date de commencement des travaux est fixée par le chef de terre du village... après les fêtes, quelque fois trop tard.
le Zaï exige 300 heures de travail très dur soit environ 3 mois pour un homme pour restaurer 1 ha.
le Zaï demande 2 à 3 tonnes de matières organiques et les charettes pour transporter la poudrette et le compost. pour réussir il faut entourer le champ à restaurer d'un cordon de pierres pour maîtriser le ruissellement.
- Améliorations : soussolage croisé à 1 dent jusqu'à 12 - 18 cm, après la récolte, tous les 80 cm, (11 heures avec des boeufs bien nourris), creuser ensuite le Zaï en 150 heures. compléter la fumure organique par N et P qui manquent dans la poudrette exposée au soleil. introduire d'autres espèces forestières élevées en pépinière (3 mois de gagné).

D'après Roose et Rodriguez, 1990

FIG. 3. — Les pratiques du zaï au cours de la saison culturale en vue de la restauration de la productivité des sols et de la réhabilitation du couvert végétal.

The zaï practice during the cropping period, for soil restoration and greencover rehabilitation.

poquets augmente en zone gravillonnaire et diminue sur le glaciis limono-argileux moins drainant (KABORE et VALDENNAIRE, 1991). Pendant la saison sèche, ces microbassins piègent des sables, des limons et des matières organiques emportés par les vents du désert. Dès les premières pluies d'avril (fig. 3), le paysan y dépose une ou deux poignées de poudrette (soit 1 à 3 t/ha de matière organique, réduite en poudre et séchée au soleil) formée d'un mélange de fèces, de litière, de compost, de cendres et autres résidus ménagers. Les termites du genre *Trinervitermes*, attirés par les matières organiques, creusent des galeries au fond des cuvettes qu'ils transforment ainsi en entonnoirs. Les eaux de ruissellement y pénétrant créent des poches d'humidité en profondeur, à l'abri de l'évaporation rapide. La pratique du zaï permet donc de concentrer dans les cuvettes l'eau de ruissellement et les nutriments contenus dans la poudrette transformée par les termites. Après un orage (ou même avant, si les pluies sont en retard), la famille sème dans chaque poquet une douzaine de graines de sorgho sur les terres lourdes (ou de mil sur un sol sableux ou gravillonnaire) : leur force réunie permettra aux petites graines de soulever la croûte de sédimentation qui se dépose au fond des cuvettes. Ces techniques de préparation des terres dégradées réduisent l'importance du sarclage à celle des surfaces des poquets (moins de 20 % la première année) et permettent de produire, en fonction des pluies, de 5 à 10 q/ha de céréales et de 2 à 4 t/ha de paille, utilisée pour le bétail, l'artisanat et divers besoins ménagers. L'année suivante, les fermiers creusent de nouvelles cuvettes entre les précédentes et rajoutent des matières organiques. S'ils sont pressés ou manquent de fumier, ils arrachent à la houe la souche de sorgho de la campagne précédente et la posent sur la surface encroûtée, où elle sera consommée en une ou deux années par les termites ; ensuite ils grattent le fond de la cuvette et y sèment directement la céréale. Les rendements sont alors moins bons qu'après fumure. Curieusement, ce système d'exploitation intensif n'accélère pas l'épuisement du sol. Au contraire, au bout de cinq ans,

toute la surface a été remuée par le labour et par les termites qui perforent la croûte à la recherche de matières organiques. D'après les paysans (Gourga, Yatenga), ce système présente le grand avantage de conserver la fumure dans le poquet alors que dans les champs labourés ordinaires le ruissellement l'emporte lors des premiers orages.

Bien que l'allure générale du zaï ressemble à celle qui est décrite ci-dessus, l'enquête a montré que chaque paysan a ses propres recettes adaptées à l'environnement de son exploitation. Certains paysans, par exemple, ont observé, dans les poquets ayant reçu des poudrettes, la germination des graines d'une douzaine d'espèces d'arbustes fourragers. Durant le sarclage, ils ont l'habitude de préserver un jeune arbuste tous les cinq poquets (fig. 3). Pour protéger ces arbustes de la dent des chèvres, le fermier coupe les tiges de sorgho au-dessus du niveau des yeux de ce prédateur pour qu'il n'aperçoive pas les frêles tiges des arbustes au milieu des nombreuses tiges de sorgho. Ces plants forestiers profitent bien de l'apport d'eau et de fumier destiné à la céréale, de telle sorte que, au bout de cinq à dix ans, ces espèces de légumineuses fourragères recolonisent ces zones désertifiées et participent au maintien de la production de céréales entre leur perchis buissonnant.

MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'objectif de cette recherche est de préciser l'importance des potentialités initiales du sol et des apports de fumure organique et minérale quant à la possibilité de restaurer la productivité des sols dégradés et de réhabiliter la jachère arbustive sylvopastorale en région semi-aride.

En 1992-1993, les possibilités d'améliorer la production de biomasse d'une culture de sorgho (variété Irat 204) par creusement de cuvettes, capture des eaux de ruissellement et complément de fumure organique (feuilles vertes, poudrette ou compost) ou minérale ont été testées sur deux champs dégradés (fig. 2 et tabl. I) :

TABLEAU I

Caractéristiques physico-chimiques de l'horizon labouré du sol ferrugineux de Pouyango et du sol brun tropical de Taonsongo, Burkina
Physico-chemical characteristics of the topsoils of the red ferruginous (at Pouyango) and the brown tropical soil (at Taonsongo), Burkina

Types de sol	Ferrugineux tropical superficiel	Brun tropical profond
C organique (%)	1,1	0,7
N total (%)	0,07	0,06
P (ppm)	0,32	0,31
Ca ⁺⁺ éch. (méq/100 g)	4,3	14,1
Mg ⁺⁺ éch. (méq/100 g)	0,7	4,6
K ⁺ éch. (méq/100 g)	0,11	0,09
pH	5,5	5,9
CEC (méq/100 g)	5,7	20,3
Saturation (%)	89	93
Argile (%) (< 2 µ)	24,3	37,4
Limons (%) (2 à 50 µ)	38,4	37,0
Sables (%) (50 à 2 000 µ)	37,6	25,8

— un sol ferrugineux tropical superficiel reposant (vers 30 cm) sur une cuirasse ferrugineuse près du village de Pouyango (12° 48' de latitude nord, 2° 8' de longitude ouest), à 10 km au nord-est de la ville de Yako ;

— un sol brun tropical plus profond (plus de 120 cm) et plus fertile sur schiste vert, au village de Taonsongo (12° 48' de latitude nord, 2° 15' de longitude ouest), à 5 km au sud-est de Yako.

La distance entre les deux sites est inférieure à 10 km

à vol d'oiseau. Bien que la hauteur de pluie ait été inférieure de 150 mm sur le second site, l'effet de la sécheresse sur la culture y a été faible car le nombre d'averses a été plus important et la capacité de stockage en eau du sol brun profond est largement supérieure à celle du sol ferrugineux superficiel. De même, les pluies de 1993 sont inférieures de 100 mm à celles de 1992, mais leur distribution durant la saison fut meilleure. Les données pluviométriques sont mentionnées dans le tableau II.

TABLEAU II
Hauteur de pluie et nombre de jours pluvieux en 1992 et 1993
Rainfall amount and rainy days number in 1992 and 1993

Pluie	1992		1993	
	mm	Jours	mm	Jours
Sol ferrugineux	706	27	632	23
Sol brun tropical	563	40	466	34

Le dispositif expérimental compare six traitements avec six répétitions dans des blocs aléatoires :

— T : le témoin, semé traditionnellement, sans aucun aménagement ;

— C : sorgho semé en poquet dans les cuvettes sans fumier ;

— C + F : idem + enfouissement de 3 t/ha de feuilles fraîches de *Azadirachta indica* ;

— C + Co : idem + enfouissement de compost pailleux (3 t/ha) ;

— C + fert. min. : idem + enfouissement d'engrais minéral (N 35, P 20, K 10 kg/ha) ;

— C + Co + fert. min. : idem + compost (3 t/ha) et N 35 + P 20 + K 10 kg/ha.

La composition des feuilles fraîches et du compost est définie dans le tableau III. Les carences en phosphore et en azote sont très nettes.

TABLEAU III
Teneur en carbone, azote, phosphore et potassium de quelques amendements organiques
Total carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium of various organic manures

	C total (%)	N total (%)	P total (%)	K total (%)	C/N	Ca éch. (%)	Mg éch. (%)	K éch. (%)
Compost	07,5	0,7	0,05	n. a.	10	0,3	0,06	0,04
Fumier	17,4	0,3	0,05	n. a.	47	0,1	0,04	0,60
Feuilles de <i>Azadirachta</i>	52,9	2,7	0,16	7,3	20	n. a.	n. a.	n. a.
<i>Piliostigma</i>	55,5	1,4	0,11	2,8	38	n. a.	n. a.	n. a.

RÉSULTATS

Production de biomasse sur le sol ferrugineux tropical superficiel

Les parcelles témoins ont produit 3 à 8 quintaux de paille et moins de 0,6 quintal de grain (tabl. IV).

Tous les traitements testés ont amélioré la production de paille (12 à 35 q/ha) et de grain (0,3 à 9 q/ha). Cependant, la seconde année, les rendements sont nettement moindres.

Le creusement des cuvettes a augmenté la disponibilité en eau, la production de grain et de paille, mais pas suffisamment pour être significatif statistiquement. Cela signifie que l'apport d'eau n'est pas le seul facteur limitant pour la production des céréales : la faiblesse de la capacité de stockage en eau et en nutriments est aussi une cause de la faible productivité de ces sols superficiels.

L'enfouissement de feuilles fraîches de *Azadirachta* a augmenté la production de grain et de paille, mais l'amélioration n'est devenue significative que la seconde année,

lorsque les nutriments des feuilles décomposées ont été libérés. Il semble que, la première année, les feuilles fraî- ches en train de fermenter ont fait obstacle à la germination des petites graines de sorgho.

TABLEAU IV
Production de grain et de paille (kg/ha) sur le sol ferrugineux superficiel de Pouyango (Burkina) en 1992 et 1993
Grain and biomass production (kg/ha) on the superficial ferrugineous soil in 1992 and 1993 at Pouyango (Burkina)

a. GRAIN						
Traitement	1992			1993		
	X	± S.D.	Test Tukey-Kramer (0,05)	X	± S.D.	Test Tukey-Kramer (0,05)
Témoin	63	31,3	a	22	17,1	a
Cuvette (C)	150	119,9	a	29	22,8	a
C + feuilles	184	164,7	a	83	36,0	ab
C + compost (Co) 1,5	317	213,6	a	140	52,3	ab
C + Co 3	690	48,6	b	257	127,5	abc
C + fert. min.	829	203,9	b	408	217,4	bcd
C + Co 3 + fert. min.	976	173,2	b	550	265,3	cd

b. PAILLE						
Traitement	1992			1993		
	X	± S.D.	Test Tukey-Kramer (0,05)	X	± S.D.	Test Tukey-Kramer (0,05)
Témoin	857	326,6	a	292	91,8	a
Cuvette (C)	1 213	581,1	a	375	243,1	a
C + feuilles	1 368	493,9	a	1 000	309,6	ab
C + Co 1,5	2 192	470,7	b	1 167	357,2	ab
C + Co 3	1 665	387,2	b	1 542	651,8	abc
C + fert. min.	3 302	870,0	b	2 375	1 460,6	bc
C + Co 3 + fert. min.	3 545	505,0	b	3 167	1 514,9	c

Chaque année, l'enfouissement de compost a amélioré très significativement la production. Mais l'analyse du compost (tabl. I) montre qu'il est pauvre en phosphore et en azote. Dans le cas du zaï où l'eau est abondante, cette carence en N et P devient le facteur limitant pour la production de céréales sur ces sols superficiels.

L'apport d'une très petite dose d'engrais minéral (80 kg/ha de N 12-P 24-K 12 + 50 kg/ha d'urée) multiplie la production de grain et paille par deux à six : l'association de ce petit complément minéral à 3 t/ha de compost donne évidemment les meilleurs résultats pour les deux campagnes.

Production de biomasse sur le sol brun tropical profond

Les rendements sur le sol brun, profond mais dégradé en surface, sont évidemment bien meilleurs que sur le sol ferrugineux pauvre et superficiel (tabl. V). On retrouve

cependant des influences semblables des divers facteurs de production testés, mais des seuils de signification différents. Ainsi, en seconde année, seul l'apport d'engrais minéral avec ou sans amendement organique procure des rendements significativement différents du témoin.

La baisse générale des rendements en seconde année a été plus faible pour les traitements recevant des engrais minéraux que pour les autres : cela confirme les problèmes de disponibilité en nutriments minéraux, en plus du déficit hydrique.

Augmentation de la diversité végétale : réhabilitation de la jachère arborescente

Les pratiques du zaï augmentent l'activité biologique du sol, en ce sens qu'elles entraînent la colonisation des champs par diverses variétés végétales. En effet, nous avons observé que les tas de poudrette contiennent les graines d'une douzaine d'espèces de légumineuses arbus-

TABLEAU V
Production de grain et de paille (kg/ha) sur le sol brun profond
de Taonsongo (Burkina) en 1992 et 1993
Grain and biomass production (kg/ha) on the deep brown tropical soil
in 1992 and 1993 at Taonsongo (Burkina)

a. GRAIN						
Traitement	1992			1993		
	X	± S.D.	Test	X	± S.D.	Test
Témoin	150	154	a	3	0,6	a
Cuvette (C)	200	63	a	13	4,2	a
C + feuilles	395	151	ab	24	7,3	a
C + Co	654	145	abc	123	82,5	a
C + fert. min.	1 383	236	bc	667	256,3	b
C + Co + fert. min.	1 704	305	bc	924	346,8	b

b. PAILLE						
Traitement	1992			1993		
	X	± S.D.	Test	X	± S.D.	Test
Témoin	946	529	a	167	75	a
Cuvette (C)	1 329	549	a	292	49	a
C + feuilles	1 990	207	ab	875	172	ab
C + Co	2 843	945	abc	1 417	511	bc
C + fert. min.	4 839	1 105	bc	2 375	706	bcd
C + Co + fert. min.	5 333	1 490	bc	3 250	857	b

tives consommées par le bétail. Ces graines, préparées par les acides gastriques des ruminants, germent rapidement et bénéficient d'apports exceptionnels d'eau et de nutriments dans les cuvettes. Les plantules profitent ensuite de la protection contre les vents et les chèvres que leur offrent les grosses tiges de sorgho. Cette variante agroforestière du zaï peut réhabiliter un système agro-sylvopastoral arbustif de *Acacia albida* et autres *Acacia*, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca*, *Calotropis procera*, *Combretum* spp., *Guiera senegalensis*, *Lannea microcarpa*, *Piliostigma reticulatum*, *Sclerocarya birrea*, *Ziziphus mauriciana*, etc. (ROOSE et RODRIGUEZ, 1990).

Le zaï peut aussi modifier considérablement la flore herbacée de ces terres dégradées. Bien que le sol soit initialement dénudé, on peut observer, après deux ans de culture, la présence d'une douzaine de légumineuses arbustives et de deux douzaines d'herbes. Les plus communes des herbes sont : *Dactyloctenium aegyptiacum*, *Ipomoea eriocarpa*, *Pennisetum pedicellatum*, *Schoenfeldia gracilis*, *Spermacoce stachidea* et *Zornia glochidiata*. On a aussi observé quelques plants de *Acanthospermum hispidum*, *Andropogon gayanus*, *Boerhavia diffusa*, *Bracharia ramosa*, *Cassia obtusifolia*, *Corchorus olitorius* et *tridens*, *Cyperus esculentus*, *Digitaria longipedicula*, *Eragrostis tremula*, *Euphorbia hirta*, *Kyllinga squamu-*

lata, *Mariscus cylindris trachyus*, *Mollugo nudicaulis*, *Panicum laetum*, *Roetbelia exaltata*, *Setaria pallide-fusca*. Toutes ces plantes sont tolérantes aux terres chimiquement pauvres.

Les graines seraient apportées par le vent, le ruissellement ou avec la poudrette. Même si le sol encroûté reste nu les premières années, la proximité des cuvettes augmente les chances de germination et de dissémination des graines, de telle sorte que le zaï a une influence très positive sur la revégétalisation des aires dégradées.

DISCUSSION

Importance du type de sol et de sa capacité de stockage

L'enquête (ROOSE *et al.*, 1992) et les résultats expérimentaux (KABORE, 1994 ; KAMBOU et ZOUGMORE, 1995) confirment la possibilité de restaurer la productivité des sols dégradés grâce aux pratiques complexes du zaï ; mais cette restauration a un coût (travail, engrais, matières organiques, transport) et l'efficacité de cet investissement dépend de la capacité du sol à stocker l'eau et les nutriments. Le zaï est bien plus rentable sur un sol brun riche et profond que sur un sol ferrugineux pauvre et peu profond (sommet de toposequence).

Influence de l'apport d'eau, de matières organiques et d'un complément minéral

La capture du ruissellement et de sa charge (solide et soluble) ne permet qu'une augmentation limitée de la production de biomasse tant que la déficience en nutriments n'est pas levée. L'apport de fumier (composté ou non, il n'y a pas de différence significative) pauvre en phosphore relève le seuil de production, mais ne supprime pas la carence en phosphore, facteur le plus limitant de ces sols (PIERI, 1989). Pour être efficace, il faut donc prévoir des compléments minéraux. Afin d'éviter l'insolubilisation du phosphore des engrais par le fer libre du sol, il est recommandé d'enfouir des phosphates calciques naturels broyés dans le fumier en voie de compostage : les acides organiques favoriseront sa disponibilité. Si la dose de fumier passe de 1,5 à 3 t/ha, la production de grain double lors des années humides, mais la production de paille change peu. L'apport de 2 tonnes supplémentaires de fumier en 1993 n'a pas amélioré significativement la production : lors d'une année sèche, l'eau disponible ne permet pas de valoriser une forte dose de fumier ni d'engrais sur les sols superficiels. Sur le sol brun profond, l'amélioration de la production est plus nette mais l'écart-type augmente beaucoup.

L'azote est le deuxième facteur chimique limitant la production de céréales. La jachère cultivée en légumineuses est une approche séduisante pour réduire cette déficience ; mais, en conditions naturelles, les légumineuses poussent très lentement sans phosphore. Comme le « fumier », dans la région, est généralement un mélange de déjections desséchées, d'un peu de paille, de cendres et de déchets familiaux, le tout exposé en plein soleil et aux pluies battantes, les pertes d'azote par gazéification et lixiviation sont élevées ainsi que le rapport C/N, de sorte qu'il faut prévoir un complément azoté pour obtenir une bonne rentabilisation des eaux disponibles. Il serait intéressant d'étudier la dose optimale des différents nutriments utiles en relation avec le risque d'échaudage si la saison des pluies se termine trop tôt. Il est probable que, grâce au captage du ruissellement par le zaï, on puisse augmenter largement la production potentielle des sols suffisamment profonds et réduire localement les risques de déficit alimentaire en cas de pluies déficitaires.

L'enfouissement de feuilles vertes n'augmente que légèrement la production de biomasse : la libération des nutriments dépendant de la vitesse de minéralisation, l'état initial de décomposition de la matière organique va déterminer l'efficacité de cette source de nutriments. Dans cet essai, les feuilles n'étaient pas bien décomposées à la fin de la saison : elles ont probablement fait obstacle (physique et sanitaire) à la levée des jeunes plantules. Cependant, leur influence positive sur les rendements augmente d'une année à l'autre. Les feuilles proviennent du neem (*Azadi-*

rachta indica), un arbre bien connu en Inde et importé en Afrique semi-aride. Dans le tableau III figure également l'analyse des feuilles de neem et d'une légumineuse arbustive bien connue en Afrique, *Piliostigma reticulatum*, traditionnellement utilisée par les paysans ne possédant pas de bétail pour « fumer » leur lopin de terre. Son influence positive sur les rendements étant moindre que celle des feuilles de neem, ce traitement fut supprimé en 1993. Le fumier, composté ou non, s'est montré bien plus efficace que les feuilles vertes, mais beaucoup moins que lorsqu'il est associé à des compléments d'engrais minéraux, même à faible dose (35 kg/ha au lieu de 60 kg/ha d'azote, 20 unités au lieu de 45 unités de phosphore et 10 kg/ha de potassium au lieu de 30 kg/ha, utilisés en station de recherche).

La réduction de production en seconde année d'expérimentation a été moins importante pour les traitements recevant un complément minéral que pour les autres. Les précipitations en 1993 ont été moins abondantes mais mieux réparties, de sorte qu'il n'y eut aucune semaine sans pluie. Comme, par ailleurs, les adventices furent plus développées, on peut penser que la concurrence vis-à-vis des nutriments disponibles a été la cause principale de la faible production de biomasse en 1993.

Après deux campagnes, on n'a pu distinguer aucune évolution significative des caractéristiques chimiques observées de l'horizon cultivé : tous les nutriments apportés ont été consommés par les plantes. Par ailleurs, l'échantillonnage et les méthodes d'analyse des sols ne sont pas assez sensibles pour faire ressortir les différences ténues de fertilité du sol que les adventices distinguent pourtant clairement. Paradoxalement, la production de biomasse s'améliore plus facilement sur les sols dégradés que les propriétés des sols, généralement liées à leur fertilité. Il serait donc plus correct de discuter de la « restauration de la productivité des sols » plutôt que de parler de « restauration des sols ». Pour optimiser la production de biomasse, nous devons assurer la disponibilité en nutriments en quantité suffisante pour les besoins des plantes en croissance, plutôt que de chercher à corriger les carences du sol, ce qui est souvent trop peu rentable (ROOSE, 1994).

Les résultats des expérimentations montrent nettement que l'approche mécanique du problème de la restauration de la productivité (labour et cuvette) n'est pas assez efficace pour réhabiliter ces sols dégradés à faible stabilité structurale. C'est l'ensemble des pratiques complexes du zaï (capture du ruissellement, enfouissement de fumier et d'un complément minéral, activités des termites perforateurs des croûtes et aménagement de l'état de surface du sol) qui nous a permis de produire jusqu'à 3 à 5,3 t/ha/an de paille et 1 à 1,7 t/ha/an de grain de céréale, alors que le témoin a produit moins de 0,3 t de paille et 0,2 t/ha/an de grain.

Influence du zaï sur la biodiversité végétale

Les pratiques du zaï ont aussi une influence profonde sur la biodiversité, en particulier sur la population d'herbes et de buissons de ces terres désertifiées. Même s'il reste des zones dénudées pendant quelques années, l'environnement des cuvettes améliore les conditions de germination et de croissance des graines apportées par le vent, le ruissellement et les animaux. Le zaï accélère la dissémination des végétaux et la réhabilitation de la jachère.

Les avantages du zaï

Les avantages principaux du zaï concernent la gestion du ruissellement, la conservation du fumier et des semences, la concentration des éléments fertilisants et de l'eau dans les cuvettes, à proximité immédiate des jeunes plantules, surtout au début et à la fin de la saison des pluies. En améliorant la rugosité de la surface du sol, le zaï permet de ralentir la vitesse du vent, de réduire la force du ruissellement, de capter des graines, des débris organiques et des particules fines, et de rétablir simultanément un système agro-sylvopastoral buissonnant. Enfin, le zaï permet d'étendre les cultures vivrières sur des terres dégradées, d'augmenter la production de céréales et d'assurer la production de la biomasse nécessaire pour le bétail.

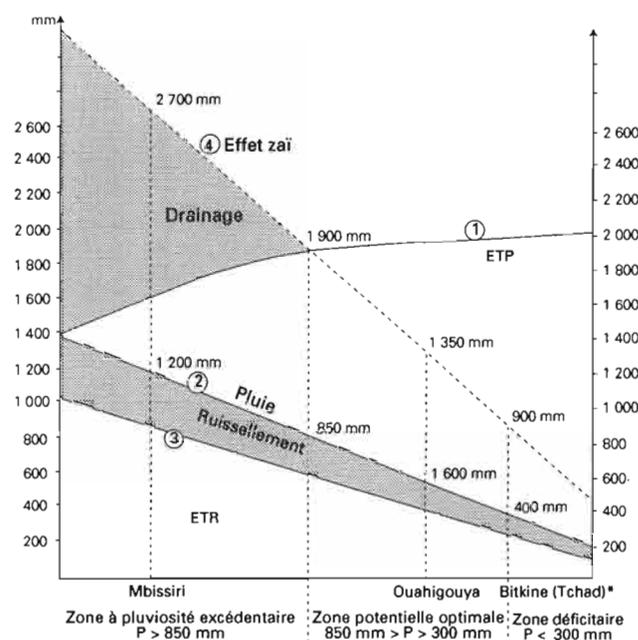
Les limites du zaï

Cette technique a aussi ses limites (fig. 4). Grâce au zaï, on peut réduire l'impact d'une sécheresse durant deux à trois semaines si la capacité de stockage en eau du sol est suffisante (minimum : 50 mm). Le zaï ne peut résoudre les problèmes ni en zone saharienne (où les pluies sont trop peu fréquentes), ni en zone trop humide, comme en zone soudanienne, où les céréales semées en poquet dans une cuvette souffrent d'engorgement et de lixiviation des bases.

Les conditions optimales pour la réussite du zaï semblent réduites à la zone soudano-sahélienne (300 à 800 mm de pluie), mais cela devrait être précisé en fonction des cultures et des sols. En effet, les cuvettes capturent le ruissellement (estimé à environ 25 % des pluies) d'un impluvium correspondant à cinq fois leur surface. À chaque pluie de 40 mm, le sol de la cuvette pourrait stocker 90 mm d'eau, soit $40 + (40 \times 5 \times 0,25)$. Nous avons effectivement observé des poches d'humidité sous une cuvette atteignant un mètre de profondeur. Au niveau du bilan annuel, une région recevant 400 mm de pluie va concentrer, dans les cuvettes du zaï, 900 mm d'eau (soit $400 + [400 \times 5 \times 0,25]$), donc largement assez pour faire face aux besoins en eau d'une céréale. Encore faut-il que la céréale supporte un engorgement temporaire, que la répartition des pluies soit correcte et que la saison ne se termine pas trop tôt pour assurer le cycle complet jusqu'au remplissage des grains. La pratique du zaï permet à la fois d'augmenter le volume d'eau disponible, de prolonger la

saison culturale et d'atténuer les effets des périodes sèches, d'autant plus que le sol a une bonne capacité de stockage de l'eau. En région soudanienne (comme à Mbissiri, au Cameroun), où les pluies dépassent 80 mm par jour et 1 200 mm par an, on observe dans les cuvettes des infiltrations très importantes (180 mm par jour et 2 700 mm par an) : les rendements en sorgho observés sur les cuvettes sont inférieurs à ceux des champs cultivés à plat, vu la fréquence de l'engorgement du sol et les risques de lixiviation des nutriments (Roose, *non publié*).

L'extension du zaï est aussi limitée par la disponibilité en fumier, en main-d'œuvre et en moyens de transport. Le zaï exige pour chaque hectare 300 heures de travail très dur à la pioche, le transport de trois tonnes de fumier



*Lieux où on a observé la pratique du zaï ou calculé le bilan hydrique.

FIG. 4. — Schéma d'estimation de bilan hydrique à pas de temps annuel en zone semi-aride à une saison pluvieuse. Évapotranspiration potentielle (ETP) (1), pluie (2), ruissellement (estimé à 25 % de la pluie en culture sarclée) (3). Effet du captage du ruissellement au niveau de la cuvette du zaï sur un impluvium cinq fois plus étendu (4). D'après ROOSE, 1994.

On constate que le zaï ne peut se pratiquer dans des zones à pluviosité annuelle inférieure à 300 mm sans augmentation des risques d'échaudage, si le sol a une faible capacité de stockage de l'eau ou si les pluies sont mal réparties et s'arrêtent trop tôt (zone déficitaire). Par ailleurs, au-delà de 850 mm de pluie, les risques d'engorgement du sol et de lixiviation des nutriments augmentent rapidement (zone excédentaire).

Draft of water balance in savannah and sahelian area of Africa. Limits of the zaï possible extension (after ROOSE, 1994).

composté et l'aménagement de cordons pierreux tout autour du champ pour contrôler le ruissellement : il est donc souhaitable de disposer d'une charrette et d'une abondante main-d'œuvre. De plus, les engrais minéraux qui rentabilisent bien cet investissement ne sont pas toujours disponibles en brousse.

Améliorations possibles du zaï

ROOSE et RODRIGUEZ (1990) ont proposé trois améliorations à la pratique traditionnelle du zaï. Un sous-solage croisé, tous les 80 cm, avec une dent pénétrant jusqu'à 15-18 cm sous la surface encroûtée du sol, après la récolte en décembre, lorsque la terre n'est pas trop durcie. L'opération nécessite onze heures de travail à l'hectare lorsque les bœufs sont bien nourris avec les résidus de culture disponibles à cette saison. Le temps nécessaire pour creuser les cuvettes en est réduit de moitié. Le paysan pourrait donc étendre la zone aménagée. Une autre amélioration consiste en un apport complémentaire d'azote et de phosphore minéral en fonction de leur faible disponibilité dans le « fumier » traditionnel (cf. tabl. I). Enfin, il est possible d'améliorer sérieusement la qualité et la quantité du compost produit (5 m³ au maximum par ménage) en aménageant, à l'abri d'un bouquet d'arbres fruitiers près de l'habitation, une double fosse « compostière-fumière-poubelle » où sont accumulés les eaux usées et les déchets fermentescibles du ménage ainsi que les résidus de leurs activités artisanales (embouche, seccos, etc.). KABORE (1994) a montré qu'avec trois tonnes de fumier on pouvait produire 500 à 800 kg/ha de grain de sorgho, et même 1 500 kg/ha avec un faible complément minéral (N 35 + P 20 + K 10 kg/ha), là où la moyenne régionale est de l'ordre de 600 kg/ha. L'apport minéral seul permet déjà une production remarquable de 800 à 1 300 kg/ha.

CONCLUSION

Dans cette zone soudano-sahélienne, la dégradation des sols trouve son origine dans le déséquilibre du bilan des nutriments et des matières organiques, suite à l'extension des cultures et au surpâturage des terres de parcours de plus en plus réduites. Sur ces sols facilement encroûtés, le ruissellement intensif balaye la surface lisse du sol, emporte les graines et matières organiques et empêche la réhabilitation de la jachère. Actuellement, les processus de désertification étendent ces clairières dénudées alors que la pluviosité y est de 400 à 800 mm.

L'étude a montré que les pratiques du zaï pouvaient restaurer la productivité du sol dès la première année, car elles appliquent les six règles de restauration rapide des sols : maîtriser le ruissellement, restaurer les macropores et les stabiliser, revitaliser l'horizon superficiel cultivé, supprimer les toxicités dues au pH inférieur à 5, corriger les carences minérales des plantes.

Les enquêtes au Yatenga ont permis de préciser la diversité et la complexité du « système zaï », lequel contribue à restaurer la capacité d'infiltration du sol, l'enracinement profond et les activités biologiques. Le zaï capte le ruissellement et concentre l'eau et les nutriments disponibles autour des touffes de sorgho. Le fumier apporte des micro-organismes et des graines. Il attire les termites et développe la croissance des céréales mais aussi des adventices et des arbustes fourragers. Un apport très réduit de matières organiques fermentées et de cendres permet la réhabilitation de la jachère. La variante « agrosylvopastorale », où les arbustes naturels sont préservés, permet d'établir un système d'aménagement durable de ces zones semi-arides fragiles.

L'expérimentation de diverses variantes du zaï sur deux sols, l'un pauvre et superficiel, l'autre relativement plus riche et plus profond, a démontré qu'en période de pluies déficitaires le zaï permet de cultiver des céréales sur des sols dégradés encroûtés et d'obtenir des rendements honorables pour la région. La capture du ruissellement ne suffit pas. Pour obtenir des rendements significatifs, il faut concentrer autour des poquets l'eau et les nutriments en quantité suffisante pour le développement des cultures.

L'amélioration des pratiques du zaï par l'apport combiné de fumier composté (3 t/ha/an) et d'une légère fertilisation minérale (N 10 + 25 + P 20 + K 10) permet d'améliorer nettement la production de céréales et de biomasse fourragère, de réduire l'insécurité alimentaire et la pression sur les terres cultivables trop fragiles. Ces apports sont trop modestes pour modifier de façon sensible les propriétés liées à la fertilité du sol. Les activités microbiennes du sol, réactivées par l'apport de fumier composté, mobilisent probablement une partie du stock considérable d'éléments nutritifs bloqués dans la masse minérale et organique du sol.

Des recherches complémentaires sont souhaitables pour aborder la dimension agro-économique de cette amélioration foncière, en particulier la rémunération du travail et la durabilité du système. Il devrait encore être possible d'améliorer le zaï, en relation avec le choix des sols (réserve hydrique minimale) et la mécanisation des techniques culturales, l'utilisation d'associations de plantes (divers haricots et céréales comme au Cap-Vert) adaptées à la culture au fond d'une cuvette. Enfin, l'amélioration et la durabilité des effets positifs du zaï passent par la production de fumier de qualité et l'apport d'un complément minéral optimal tenant compte du faible pouvoir d'achat des paysans, de la capacité réduite de stockage des sols et du risque climatique en région semi-aride.

REMERCIEMENTS

Vincent Kabore exprime ses remerciements à la Direction de la Coopération suisse au développement et à l'aide humanitaire

(DDA), à Intercoopération à Berne et à Buco à Ouagadougou ainsi qu'à l'équipe EPFL, pour leur appui moral et financier. Éric Roose remercie également le ministère français de la Coopération et le Cirad qui lui ont permis d'effectuer ses observations au cours de missions d'encadrement du projet « recherche-développement » à Ouahigouya.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGRE (J.), 1988 — « Diguettes en pierres et poches d'eau : Rawana, Yatenga, Burkina Faso ». In : *Le Sahel en lutte contre la désertification : leçons d'expériences*, CILLS, PAC/GTZ : 221-238.
- BILLAZ (R.), 1980 — « Sabouna, un village du Yatenga : ses hommes, ses cultures ». In : *Les systèmes de culture*, Ouagadougou, IPD-AOS, 103 p.
- BOULET (R.), 1976 — *Notice des cartes de ressources en sols au 1/500 000 de la Haute-Volta*. Paris, ministère de la Coopération/Orstom, 97 p.
- BREMAN (H.), UTHOL (P.), 1986 — *Projet de production primaire au Sahel : survol du Centre de recherches agrobiologiques (Cabo)*. Wageningen, 115 p.
- CRITCHLEY (W.), REIJ (C.), TURNER (S.), 1992 — *Soil and water conservation in sub-saharan Africa. Towards sustainable production by the rural poor*. Amsterdam, IFAD/CDCS Free University, 110 p.
- DUGUÉ (P.), 1989 — *Possibilités et limites de l'intensification des systèmes de culture vivriers en zone soudano-sahélienne. Cas du Yatenga (Burkina Faso)*. Montpellier, Cirad, coll. Documents systèmes agraires, 350 p.
- HUDSON (N. W.), 1992 — *Land husbandry*. London, Batsford, 192 p.
- KABORE (V.), 1995 — *Amélioration de la production végétale des sols dégradés (zipellés) du Burkina Faso par la technique des poquets (zaï)*. Thèse doct., EPFL (n° 1302), Lausanne, 201 p.
- KABORE (V.), VALDENNAIRE (S.), 1991 — *Contribution à l'étude du zaï, pratique culturelle réhabilitée au Yatenga*. Mémoire, EPFL, Lausanne, 57 p.
- KAMBOU (N.), ZOUGMORE (R.), 1995 — Évolution des états de surface d'un « zipellé » soumis à différentes techniques de restauration des sols (Yilou, Burkina Faso). *Bull. Réseau Érosion*, 16 : 19-32.
- MARCHAL (J.-Y.), 1983 — *Yatenga, Nord Haute-Volta. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 167, 849 p.
- MARCHAL (J.-Y.), 1986 — Vingt ans de lutte antiérosive au Burkina Faso. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 173-180.
- MIETTON (M.), 1988 — *L'érosion en zone de savane du Burkina Faso. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère*. Thèse, géographie, univ. Grenoble, 511 p.
- PIERI (C.), 1989 — *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, ministère de la Coopération et du Développement/Cirad, 433 p.
- REIJ (C.), 1994 — La conservation des eaux et des sols donne des résultats. *Haranata*, 25 : 11-13.
- ROOSE (E.), 1980 — *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Thèse doct. ès sciences, univ. Orléans, 587 p.
- ROOSE (E.), 1992 — « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols ». In Le Floc'h (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.
- ROOSE (E.), 1993 — « Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne ». In : *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires : 233-244.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.), 1990 — *Aménagement de terroirs au Yatenga. Quatre années de GCES : bilan et perspectives*. Montpellier, Orstom, 40 p.
- ROOSE (E.), ARRIVETS (J.), POULAIN (J.-F.), 1979 — *Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux issus de granite : Saria, 1971-1974*. Paris, Orstom, 123 p.
- ROOSE (E.), DUGUÉ (P.), RODRIGUEZ (L.), 1992 — La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terroir en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, 233 : 49-61.
- WRIGHT (P.), 1982 — *La gestion des eaux de ruissellement*. Oxfam-ORD Yatenga (Burkina Faso), Projet agroforestier, 25 p.

Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique

Paul QUANTIN (1), Christian PRAT (2) et Claude ZEBROWSKI (1)

(1) Orstom, 32, avenue Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France.

(2) CPM, 56230 Chapingo, Mexique.

RÉSUMÉ

Au Mexique, sur le haut plateau central, dans les États de Mexico et de Tlaxcala, l'érosion a fait affleurer des horizons indurés de sols volcaniques, appelés « tepetates ». Une étude de la restauration de sols agricoles sur ces matériaux stériles et de leur conservation a été réalisée. L'étude concerne notamment les propriétés des tepetates qui limitent l'infiltration de l'eau et leur fertilité ainsi que celles qui sont favorables à la restauration d'un sol agricole fertile et stable.

Cet exposé présente les résultats majeurs à propos de l'érosivité des pluies, du ruissellement et de l'érosion, de l'évolution des états de surface, des rendements des cultures et de la rentabilité de cette restauration en milieu paysan.

La valeur cumulée d'érosivité annuelle des pluies ($E \times I_{30}$ de Wischmeier) mesurée sur quatre stations expérimentales, pour une pluviosité moyenne annuelle de 700 à 800 mm et six mois de pluie, varie de faible (200 en R_{USA}) à moyenne (400 en R_{USA}). Le nombre de pluies érosives varie de quatre à treize ; mais le nombre de pluies moyennement à fortement érosives varie de zéro à cinq seulement. Les pluies fortement érosives ($I_{30} > 50$ mm/h et $E \times I_{30} > 1\ 000$ MJ/ha \times mm/h) sont rares. La majeure partie du ruissellement et de l'érosion est due aux quelques pluies vraiment érosives.

Sur tepetate nu et non travaillé le ruissellement des pluies érosives varie de 70 à 90 % ; mais l'érosion est limitée entre 5 et 10 t/ha/an. L'effet d'un simple sous-solage profond réduit de moitié le ruissellement et l'érosion. Mais la fragmentation et la culture d'un tepetate laissé à nu, sans façon antiérosive, augmentent très fortement son instabilité, l'érosion atteignant des valeurs de 22 à 128 t/ha selon l'érosivité des pluies, bien que le taux de ruissellement soit compris entre 35 et 45 %.

C'est la fraction fine, inférieure à 2 mm, qui est responsable de l'instabilité du tepetate cultivé et de l'érosion, ainsi que de la formation de croûtes qui réduisent l'infiltration. Il faut donc limiter au minimum le travail du tepetate.

Sur tepetate cultivé, l'effet du billonnage, avec ou sans couvert de maïs, est très efficace sur les pluies faiblement érosives, réduisant à 10 % le ruissellement et à 1 t/ha/an l'érosion. Mais les pluies fortement érosives augmentent le ruissellement à plus de 20 % et surtout l'érosion à près de 26 t/ha/an. Il est recommandé de limiter les façons culturales et de cloisonner les billons pour réduire les risques d'érosion lors de fortes pluies.

La productivité des tepetates cultivés, avec fertilisation minérale (N 60-120 et P 60) et avec ou sans fumure organique, devient bonne en seulement trois à cinq années de culture. En première année, le blé et la vesce ont un rendement presque normal ; le maïs et le haricot au contraire ne produisent pas, par carence probable de micro-organismes symbiotes. Un amendement organique avec insémination de symbiotes spécifiques pourrait résoudre ce problème. Dès la troisième année, les rendements de maïs sont normaux et en cinquième année ils sont optimaux.

Un important travail de « roturación » et terrassement, une fertilisation minérale ou organique modérée et une rotation culturale adaptée (blé, puis maïs-fève-haricot) permettent au paysan mexicain la restauration rapide (trois à cinq ans) d'un sol agricole. Cette opération est rentable sur huit années de culture ; mais elle suppose pour les

petites exploitations de moins de 20 ha par famille une certaine aide de l'État (travaux à moindre coût, financement à intérêt réduit). C'est une ressource en sol quasi nécessaire pour les petits paysans, outre qu'elle est rentable et durable.

MOTS CLÉS : Mexique — Tepetate — Érosion — Restauration — Sols indurés.

ABSTRACT

SOIL RESTORATION AND CONSERVATION FROM THE "TEPETATES" INDURATED VOLCANIC SOILS IN THE MEXICO AND TLAXCALA STATES (MEXICO)

Introduction. The volcanic soils of the central high plateau in Mexico often have some indurated horizons, locally named « tepetates ». The erosion of superficial soil leaves barren areas over the piedmonts and plateaus of the Mexico Valley and Tlaxcala Country. Indeed it is a serious problem in these countries, densely populated and traditionally dedicated to subsistence crops. Therefore numerous studies and trials have been made in order to reclaim the tepetate soils.

Rehabilitating fertile soils. The major constraints of tepetates are: a very narrow porosity which hinders air and water infilling as well as rooting; a lack of organic matter and nitrogen; a severe deficiency in available phosphorus. The methods for restoring a fertile soil are: a deep subsoiling and an appropriate breaking of tepetate layer by special tillage; terracing for soil and water conservation; fertilizing by mineral nitrogen and phosphorus, and sometimes manure addition.

Soil conservation trials, rainfall erosivity index and soil erodibility. Trials have been made in small plots at four experiment stations by comparing the behaviour of barren tepetates with cultivated ones under various treatments. The average rainfall ranges from 600 to 800 mm/year. The dry season is six months long. The rainfall erosivity index is fairly low, from 200 to 400 (in American units Wischmeier index). Only few (1 to 5 per year) rainfalls are effectively erosive (I_{30} value > 30 mm/hour and $E \times I_{30} > 400$ MJ/ha \times mm/h). On a natural barren tepetate the average runoff amounts to about 70 % of the whole rainfall; but the soil loss is only 5 to 10 t/ha/year. On a cultivated tepetate without crop the runoff is reduced, but the soil loss increases from 22 to 128 t/ha/year, according to the rainfall erosivity values. On a cultivated tepetate with maize and with furrowing and ridging against slope, the runoff is strictly controlled between 5 and 20 % while the soil loss is strongly reduced between 1 and 26 t/ha/year, according to the rainfall erosivity values. Nevertheless the cultivated tepetates are not perfectly stable. Some encrusting of soil surface develops with time and hinders more and more the rainwater infilling.

Crop trials, productivity and crop profits. Four crops, such as maize (corn), wheat and two bean species, as well as vetch (for green manure) have been tested using only N and P mineral fertilizers or adding manure. Wheat and vetch grow fairly well and give rather good yields from the first year of cultivation, while maize and beans grow badly and give very poor yields, even after manure fertilizing. However the soil productivity for maize and beans quickly improves after 2 or 3 years of cultivation, so crop yields become good enough after only 3 to 5 years. A socio-economic inquiry conducted by several families of farmers shows that tepetate reclaiming is an important soil resource for small farms (< 20 ha/family). Owing to good yields obtained from the third year of cultivation it is expected to pay off almost all reclaiming investments after about eight years of cultivation. However some financial assistance is needed from the State departments such as capital loan and reclaiming works at the cheapest cost, as well as some instructions for suitable and appropriate management.

KEYWORDS : Mexico — Tepetate — Erosion — Restoration — Indurated soils.

RESUMEN

EROSIÓN Y REHABILITACIÓN DE SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS « TEPETATES » DE LA REGIÓN DE MÉXICO Y DE TLAXCALA, MÉXICO

En México, en la alta meseta central, en los estados de México y de Tlaxcala, la erosión ha provocado el afloramiento de capas endurecidas de suelos volcánicos llamadas « tepetates ». Se realizó un estudio de la rehabilitación de suelos agrícolas en esos materiales estériles y de su conservación.

El estudio abarca en especial las propiedades de los tepetates que limitan la infiltración del agua y su fertilidad, así como de aquellas que son favorables a la restauración de un suelo agrícola fértil y estable.

Este artículo presenta los resultados más importantes relativos a la erosividad de las lluvias, al escurrimiento superficial y a la erosión, a la evolución de los estados de superficie, a los rendimientos de los cultivos y a la rentabilidad de dicha restauración en el ámbito campesino.

El valor acumulado de erosividad anual de las lluvias ($E \times I_{30}$ de Wischmeier) medido en cuatro estaciones experimentales para una pluviosidad promedio anual de 700 a 800 mm y 6 meses de lluvia, varía de bajo (200 en U. Am.) a mediano (400 en U. Am.). El número de lluvias erosivas varía de 4 a 13, pero el de lluvias mediana a fuertemente erosivas va solo de 0 a 5. Las lluvias fuertemente erosivas ($I_{30} > 50$ mm/h y $E \times I_{30} > 1\ 000$) son escasas. La mayor parte del escurrimiento superficial y de la erosión se debe a las pocas lluvias verdaderamente erosivas.

En tepetate desnudo y no trabajado, el escurrimiento superficial de las lluvias erosivas varía del 70 al 90 %, pero la erosión se limita a 5 a 10 t/ha/año. El efecto de un simple subsoleo profundo reduce en un 50 % el escurrimiento superficial y la erosión. Sin embargo, la fragmentación y el cultivo de un tepetate dejado al desnudo, sin medidas anti-erosivas, aumenta considerablemente su inestabilidad, y la erosión tiene valores de 22 a 128 t/ha/año según la erosividad de las lluvias, aunque la tasa de escurrimiento superficial se reduce solamente en un 35-45 %.

Es la fracción fina, inferior a 2 mm, la responsable de la inestabilidad del tepetate cultivado y de la erosión, al igual que del encostramiento que reduce la infiltración. Se debe entonces limitar a lo mínimo el trabajo del tepetate.

En tepetate cultivado, el efecto de los camellones, con o sin cobertura de maíz, es muy eficaz para lluvias debilmente erosivas, reduciendo al 10 % el escurrimiento superficial y a 1 t/ha/año la erosión. Sin embargo, las lluvias fuertemente erosivas aumentan el escurrimiento superficial en más del 20 % y sobre todo la erosión a 26 t/ha/año. Se recomienda limitar las labores de cultivo y compartimentar los camellones para reducir los riesgos de erosión al producirse lluvias fuertes.

La productividad de los tepetates cultivados, con fertilización mineral (N 60-120 y P 60), y con o sin abono orgánico, se torna buena en solo 3 a 5 años de cultivo. En un primer año, el trigo y la veza tienen un rendimiento casi normal; por el contrario, el maíz y el frijol no producen, por una probable carencia de micro-organismos simbiotes. Un abono orgánico con inseminación de simbiotes específicos podría resolver tal problema. Desde el tercer año, los rendimientos de maíz son normales y a partir del quinto año son óptimos.

La restauración de los tepetates como suelo agrícola, con un importante trabajo de roturación y terraceo, al igual que una fertilización mineral y orgánica moderada, una rotación de cultivo adecuada (trigo y luego maíz-haba-frijol) permite al campesino mexicano la rápida restauración (3 a 5 años) de un suelo agrícola. Esta operación es rentable en 8 años de cultivo, pero implica, para las pequeñas explotaciones de menos de 20 ha/familia, una cierta ayuda del Estado (trabajos al menos costo, financiamiento con bajos intereses). Es un recurso en suelos casi necesario para los campesinos, además de ser rentable y sostenible.

PALABRAS CLAVES : México — Tepetate — Erosión — Restauración — Suelos endurecidos.

INTRODUCTION

Les sols du haut-plateau central mexicain présentent des horizons indurés, appelés localement « tepetates » (« lits de pierre » en nahuatl). Ceux-ci apparaissent surtout après l'érosion du sol superficiel sur les piémonts des massifs volcaniques et les plateaux, qui laisse à nu des surfaces quasi stériles. Leur superficie dans la vallée de Mexico, au pied de la Sierra Nevada, et dans la région de Tlaxcala représente 30 à 40 % des terres vouées à l'agriculture vivrière. L'insuffisance de terres agricoles est un problème grave dans cette région surpeuplée, proche de la mégapole de Mexico. C'est pourquoi de gros efforts sont faits (de-

puis près de vingt ans) avec l'appui des États pour réhabiliter les tepetates en terres fertiles et également contrôler l'érosion.

L'aménagement consiste en une *roturación* (sous-solage profond, labour et pulvérisage par des disques), pour fragmenter, ameublir et permettre l'infiltration de l'eau et de l'air, puis un remodelage en terrasse, généralement en pente, avec ados et bande d'arrêt isohypse. Une fertilisation organique (si possible) et minérale pallie la carence initiale en azote, phosphore, et produits organiques éventuellement (humus, microorganismes). Une rotation culturale adaptée à l'expérience des agriculteurs, blé ou orge d'abord, puis maïs et haricot, permet d'assurer la

transition d'un sol stérile à un sol fertile. La production devient normale à partir de trois à cinq années de culture (MARQUEZ *et al.*, 1992 ; QUANTIN, 1992).

Un premier programme de la Communauté européenne (CCE-STD2), entre 1989 et 1992, a été consacré à l'étude des tepetates (caractères, origine et propriétés) ; puis à la mesure de l'érosion sur des petites parcelles ; enfin au suivi agronomique et socio-économique d'essais de réhabilitation agricole. Un rapport de synthèse (QUANTIN, 1992) en présente les résultats majeurs.

Un second programme (CCE-STD3) commence. Il est davantage orienté vers l'expérimentation à l'échelle paysanne de la « régénération et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine », notamment en Équateur et au Mexique.

L'objet de cet article est de présenter brièvement les résultats du premier programme concernant la mesure de l'érosion en petites parcelles dans la vallée de Mexico et la région de Tlaxcala, ainsi que quelques données de la production agricole au cours des premières années de remise en culture. Nous donnerons aussi un aperçu des premières mesures de bilan hydrique et d'érosion du second programme (PRAT *et al.*, 1993).

MESURE DE L'ÉROSION

L'étude de l'érosion a été réalisée sur des petites parcelles expérimentales, pour la plupart de 22 m × 2 m (normes de Wischmeier), avec une pente moyenne de 8 à 9 %. Les tepetates testés, de deux types, t2 et t3 (QUANTIN, 1992), ont une consistance de fragipan (dure à l'état sec, friable à l'état humide). Ils contiennent de 30 à 40 % d'argile. Leur cohésion est due à l'empilement face à face des argiles et probablement un peu de silice (gel, opale) intercalaire (HIDALGO, 1995). Leur porosité totale est de 40 à 55 %, mais leur macroporosité est faible, généralement inférieure à 5 %, voire nulle ; de sorte que la conductivité hydraulique est très faible, inférieure à 1 mm/h, et la porosité à l'air est très restreinte. C'est pourquoi ils affleurent lors de l'érosion du sol et demeurent stériles.

Les mesures ont été faites sur quatre stations (San Miguel Tlaixpan, El Carmen, Matlahochan, Tlalpan), dans des conditions semblables d'altitude (2 500 à 2 600 m), de pente (8 à 9 %) et de climat ($T = 13\text{ °C}$; $P = 700\text{-}800\text{ mm}$) ; elles ont permis de tester une variation locale du régime et de l'intensité des pluies. Nous avons comparé un sol agricole normal cultivé (à nu ou avec maïs billonné) à un tepetate mis à nu par l'érosion et à un tepetate avec *roturación*, à nu, ou couvert d'une plante cultivée (blé à plat, maïs en billon). Nous avons mesuré les pluies (pluviogramme), le volume d'eau ruisselée et le poids de terre érodée. En outre, nous avons effectué des mesures périodiques : humidité du sol, densité-porosité et granulométrie. Nous avons enfin suivi l'évolution des états de surface, à

savoir la formation de croûtes, la diminution de taille des agrégats et la vitesse d'infiltration.

Les principaux résultats concernent l'analyse de l'érosivité des pluies ($E \times I_{30}$), du ruissellement et de l'érosion, et l'évolution des états de surface.

Érosivité des pluies

Le régime climatique hygrothermique est de type « ustic-isomesic » ($T_m = 13\text{ °C}$; $P_m = 700\text{ à }800\text{ mm}$). La saison des pluies, de mai à octobre pendant la période estivale, alterne avec six mois de saison sèche et un peu plus froide.

L'analyse de l'érosivité des pluies a été faite à partir des pluviogrammes de l'année 1991, enregistrés dans les quatre stations. L'indice $E \times I_{30}$ de WISCHMEIER (1958) a été converti en unités américaines, pour être comparé à d'autres données de la littérature. Les calculs en unités internationales de I_{30} (mm/h) et $E \times I_{30}$ (MJ/ha × mm/h) ont également été faits. Nos collègues allemands (BAUMANN, 1992) ont pour leur part calculé l'indice d'érosivité AIm (LAL, 1976). Toutes ces données sont rassemblées dans le rapport de synthèse (QUANTIN, 1992). Nous ne présenterons ici que les résultats majeurs et leur interprétation.

Le tableau I donne les valeurs de la pluviosité et de l'indice cumulé d'érosivité pour les quatre stations.

La pluviosité a été supérieure de près de 100 mm sur le versant de Tlaxcala (El Carmen, Tlalpan et Matlahochan), en regard du versant de Texcoco dans la vallée de Mexico (San Miguel Tlaixpan). Il y a donc un effet de versant. En outre, pour une même quantité globale de pluie sur le versant de Tlaxcala, le nombre de jours de pluies et surtout leur intensité et leur indice d'érosivité varient : la valeur de $E \times I_{30}$ oscille entre 234 et 429. Plus le régime est irrégulier (à Matlahochan), plus il est érosif. Cet effet est confirmé (voir ci-après) par les mesures de ruissellement et d'érosion.

TABLEAU I
Pluviosité et érosivité des pluies en 1991
Rainfall and erosivity (1991)

Station	Pluies		Érosivité	
	H (mm)	Nbre jours	$E \times I_{30}$ ⁽¹⁾	AIm ⁽²⁾
San Miguel T.	669	99	200	
El Carmen	779	120	234	261
Tlalpan	803	112	357	330
Matlahochan	775	96	429	418

(1) Indice de Wischmeier (unités américaines).

(2) Indice de Lal.

Les valeurs calculées de l'indice d'érosivité, en 1991, se situent dans le rang d'observations (entre 200 et 600) de ROOSE (1981) en région « tropicale sèche ». Ces valeurs

varient donc de faibles à moyennes. En fait, le nombre de pluies effectivement érosives est très réduit, si l'on se réfère aux valeurs de I_{30} et $E \times I_{30}$ calculées et aux résultats concernant les pertes en terre observées après chaque pluie. Le tableau II présente ces pluies exceptionnelles et les classe pour chaque station par ordre d'intensité érosive.

Chaque station, pour une pluviosité semblable, se différencie donc par le nombre et surtout l'intensité des pluies

érosives : à San Miguel, seulement quatre pluies peu érosives ; à El Carmen, trois peu érosives et trois moyennement érosives ; à Tlalpan, trois peu érosives, trois moyennement érosives et deux fortement érosives ; à Matlahocan, neuf peu érosives, trois moyennement érosives et une fortement érosive. Il y a peu d'événements érosifs chaque année mais ils sont responsables de 60 à 80 % de l'érosion totale.

TABLEAU II
Pluies érosives en 1991 : nombre, intensité, érosivité
Erosive rainfalls (1991) : number, intensity, erosivity

	Peu érosive		Moyennement érosive	Fortement érosive	Total
I_{30} (mm/h)	25-30		30-50	> 50	
$E \times I_{30}$ (MJ/ha x mm/h)	100-200	200-400	400-1000	> 1000	
San Miguel T.	4	-	-	-	4
El Carmen	-	3	3	-	6
Tlalpan	-	3	3	2	8
Matlahocan	-	9	3	1	13

Les valeurs de l'indice AIm proposé par Lal pour les régions tropicales sont proches de celles de $E \times I_{30}$. Le calcul de $E \times I_{30}$ pour les petites pluies est sujet à discussion ; cela influe sur la valeur cumulée annuelle, et la précision n'est pas suffisante pour établir une corrélation avec l'intensité du ruissellement et de l'érosion. Il conviendrait de faire une analyse plus fine des pluviogrammes au pas de temps de 10 min, voire de 5 min, pour mieux exprimer l'effet de fortes intensités de pluie pendant une courte durée.

Ruissellement et érosion

Des mesures ont été faites en 1990 et en 1991, respectivement en première et en deuxième année après la *roturación* du tepetate. Mais nous ne présenterons dans le tableau III que les résultats concernant le ruissellement et l'érosion obtenus en 1991 sur les quatre stations. C'est la seule année où nous avons utilisé la même plante cultivée (maïs en billon) sur toutes les stations. C'est aussi l'année où nous disposons de l'analyse de l'érosivité des pluies, du suivi du régime hydrique des sols et de l'évolution des états de surface au cours de la saison des pluies.

Les tepetates t2 et t3 mis à nu par l'érosion ont un comportement semblable. Le taux de ruissellement moyen annuel est voisin de 70 %. Il n'est pas total car les premières pluies et les petites pluies s'infiltrent par les fentes de retrait. Mais le ruissellement atteint 80 à 90 % lors des fortes pluies. L'érosion est normalement faible, entre 5 et 10 t/ha/an (sauf cas exceptionnel sur t3 à Tlalpan), du fait de la compacité et de la stabilité du tepetate originel.

Un seul sous-solage profond du tepetate, laissé à nu, réduit à 40 %, soit de moitié, le ruissellement (mesuré en 1990), ainsi que l'érosion à 2 t/ha/an ; il y a amélioration de l'infiltration et de la rugosité de surface, sans déstabilisation des agrégats.

L'effet d'une *roturación* complète du tepetate (sous-solage suivi de plusieurs labours profonds et pulvérisages à disques, pour obtenir un agrégat optimal en première année, puis un labour profond en deuxième année), laissé à nu, est variable selon l'érosivité des pluies : sur la station la moins érosive (San Miguel Tlalpan), le taux de ruissellement est de 10 à 20 % et l'érosion de 21 t/ha/an. Dans la région de Tlaxcala, avec des pluies plus intenses, le ruissellement atteint 30 à 40 % ; et surtout l'érosion augmente rapidement à 72-78 t/ha/an sur la station d'El Carmen avec des pluies moyennement érosives et à 128 t/ha/an sur la station de Tlalpan avec deux pluies fortement érosives. Sans ouvrage antiérosif, ni couverture végétale, le tepetate avec *roturación* et labouré est donc très érodible. Les agrégats fins sont instables.

L'effet du billonnage, que le tepetate cultivé soit non couvert ou planté en maïs, est spectaculaire sur la station la moins érosive (San Miguel Tlalpan) : le ruissellement est réduit à 5 % sous couvert de maïs et à 12 % sur sol nu, et l'érosion à 1 t/ha dans les deux cas. Mais avec l'intensité des pluies, même sous couvert de maïs, le ruissellement augmente à 10 % sur la station modérément érosive (El Carmen) et à 20 % sur la plus érosive (Tlalpan) ; et surtout l'érosion s'accroît sensiblement à 23 t/ha/an sur le tepetate t2 à El Carmen et 26 t/ha/an sur le tepetate t3 à Tlalpan (station la plus érosive). À partir d'un certain

TABLEAU III
Mesures de perte en terre et de ruissellement en 1991
Sediment loss and runoff measures (1991)

Station	Traitement	Longueur (m)	Érosion (t/ha)	Ruissellement (%)
San Miguel T.	1. T t3, nu	22	5,05	88 ⁽¹⁾
	2. T, L, nu	22	21,89	44 ⁽¹⁾
	3. T, L, B, nu	22	1,04	12 ⁽¹⁾
	4. T, L, B, maïs	22	1,24	5 ⁽¹⁾
	5. T, L, B, maïs	10	1,18	5 ⁽¹⁾
	6. Sol, L, B, nu	22	1,10	12 ⁽¹⁾
	7. Sol, L, B, maïs	22	1,79	11 ⁽¹⁾
El Carmen	t3 T, nu	3	8,0	70 ⁽²⁾
	t2 T, nu	3	6,3	67 ⁽²⁾
	t2 T, L, nu	22	78,0	34 ⁽²⁾
	t2 T, L, B, maïs	22	23,0	11 ⁽²⁾
Tlalpan	t3 T, nu	3	41,0	68 ⁽²⁾
	t2 T, nu		7,5	65 ⁽²⁾
	t3 T, L, nu	22	128,0	43 ⁽²⁾
	t3 T, L, B, maïs	22	26,0	21 ⁽²⁾
Matlahocan	t3 T, nu	6	8,8	75 ⁽²⁾
	t3 T, R, arbustes	6	26,0	61 ⁽²⁾
	Sol, nu	22	47,0	34 ⁽²⁾
	Sol, savane	22	0,3	10 ⁽²⁾

T : tepetate (t2 ou t3). L : sous-solé et labouré. R : sous-solé. B : billonné.
Érosion : perte en terre globale. Ruissellement : en % du volume des pluies.
(1) Estimation moyenne sur les trois pluies les plus érosives.
(2) Pourcentage du total des pluies.

seuil, le ruissellement n'est plus contenu et il y a risque de rupture des billons et d'érosion forte. En outre, l'effet de couverture du maïs, dont le développement est trop tardif, sur l'érosion n'est pas évident dans la station faiblement érosive (San Miguel Tlaixpan) ; mais la comparaison avec un sol billonné à nu n'a pas été faite sur les stations plus érosives.

Sur le sol originel (avant érosion) sous savane arbustive naturelle, il n'y a qu'un faible taux de ruissellement (10 %), et pratiquement pas d'érosion, bien qu'il s'agisse de la station la plus érosive (Matlahocan). Sur le même sol privé de son manteau végétal et dans la même station, le ruissellement monte à 34 % et l'érosion à 47 t/ha/an. Le sol étant labouré, l'effet du billonnage est efficace dans la station faiblement érosive, aussi bien sur sol nu que cultivé en maïs, restreignant le ruissellement à 11-12 % et l'érosion à 1-2 t/ha/an. Ce résultat est proche de celui observé sur un tepetate cultivé, bien que le sol soit moins stable que le tepetate. Ce serait sans doute différent pour des

pluies plus érosives, mais cela n'a pas été mesuré. Nous n'avons pas non plus fait d'observations sur le sol cultivé et non billonné à nu dans la station faiblement érosive.

En 1992, de nouvelles mesures ont été effectuées sur le tepetate naturel (t3), à San Miguel Tlaixpan, mais sur une grande parcelle de 1 800 m² (au lieu de 44 m²) et une pente de 8 à 10 % (PRAT *et al.*, 1993), afin de vérifier l'effet dimensionnel. Le régime des pluies a été semblable à celui de 1991 (90 jours de pluie, trois à quatre pluies érosives seulement). Le tableau IV présente les valeurs de l'érosivité et du ruissellement en fonction du nombre de pluies, pendant la période de mesure (78 pluies seulement).

Pendant cette période, la perte en terre globale a été de 10 t/ha/an environ, soit le double de ce qui a été mesuré sur petite parcelle, à la station de San Miguel Tlaixpan, mais du même ordre de grandeur que sur l'ensemble des quatre stations (5 à 10 t/ha/an). Le taux de ruissellement des pluies érosives ($E \times I_{30} > 80$) est supérieur à 70 %. Cela confirme donc les résultats de 1991.

TABLEAU IV

Mesures d'érosivité et de ruissellement sur tepetate nu en 1992
Erosivity and runoff on bared tepetate (1992)

Pluies		Exl ₃₀	Ruissellement
Nombre	(%)	(MJ/ha x mm/h)	(%)
40	53	< 7	< 40
15	20	7 à 25	40 à 50
10	13	25 à 80	50 à 70
3	4	> 80	> 70

Les résultats obtenus sur tepetate sont comparables à ceux observés sur la « cangahua » en Équateur (CUSTODE

et al., 1992) durant une période de cinq années (1987-1991), pour une pluviosité moyenne de 660 mm (proche de celle de la station la moins érosive, San Miguel Tlaixpan, mais sur une pente plus forte, 22 %) (tabl. V).

Les valeurs mesurées sur sol originel sont comparables, en ce qui concerne le taux de ruissellement, à celles mentionnées par ROOSE (1981) en région « tropicale sèche » sur des sols ferrugineux tropicaux et pour une pluviosité moyenne annuelle de 850 mm : sous savane, 10-15 % ; sur sol nu, 35-43 % ; sur sol cultivé, 10-40 %. L'érosion y est également très faible sous savane : 0,2 à 0,7 t/ha/an ; modérée sur sol cultivé : 1 à 14 t/ha/an ; mais un peu moins élevée sur sol nu : 10 à 35 t/ha/an. Dans l'ensemble, les ordres de grandeur sont semblables.

TABLEAU V

Ruissellement et érosion sur cangahua de l'Équateur
Runoff and erosion on Ecuadorian cangahua

Traitement	Ruissellement (%)		Érosion (t/ha)
	moyen	maximal	
Cangahua nue, cultivée en surface	20-30	60-90	96,6
Cangahua cultivée, culture traditionnelle	7-14	30-55	18,9
Cangahua cultivée, culture améliorée	2-9	9-55	4,5

Évolution des états de surface

Les états de surface ont été observés, selon la méthode de CASENAVE et VALENTIN (1989), par J.-L. Janeau et son élève G. JÉROME (1992), sur des parcelles de tepetate avec *roturación* et de sol cultivés en maïs avec billonnage, ainsi que sur un tepetate laissé à nu. Ces observations ont été faites en six fois : au début et à la fin des trois périodes de façons culturales (du semis au premier sarclage ; jusqu'au second sarclage et buttage du maïs ; jusqu'à la récolte). Cette étude comporte l'observation de la formation de croûtes (structurales et de dépôt), des formes d'érosion, de la fonte des agrégats, des modifications du modelé ; ainsi que des mesures de porosité, de vitesse d'infiltration et d'humidité du sol. Ces observations ont permis de suivre le processus qui conditionne l'évolution du comportement au ruissellement et à l'érosion.

Dans le cas du sol et du tepetate cultivés en maïs avec billonnage, le comportement se modifie par suite de la formation de croûtes superficielles, structurales sur les billons ou de dépôt dans les dépressions. Sur le sol, l'évolution est rapide, car la fonte totale des agrégats est elle-même rapide et très importante (50 à 80 % en fin de culture). Sur le tepetate cultivé, l'évolution est plus lente et progressive, car les agrégats de plus de 2 mm sont plus stables et leur fonte n'est que partielle (réduction de taille). Au cours de la première période culturale (jusqu'au premier sarclage), l'évolution est lente, les agrégats sont sta-

bles et l'infiltration demeure rapide. Mais, au cours de la deuxième période et surtout de la troisième, le processus s'accélère : la fonte des agrégats s'accroît, la formation de croûte s'intensifie et se généralise, la porosité diminue et se rapproche de l'état initial avant *roturación*, la vitesse d'infiltration se ralentit fortement et devient faible (tabl. VI). En conséquence, le ruissellement et la susceptibilité à l'érosion s'accroissent. En fait, ce sont les agrégats de taille inférieure à 2 mm qui fondent totalement et alimentent la formation des croûtes et les pertes en terre. Une expérimentation en laboratoire avait montré que l'agrégat « optimal » se situe vers 3 mm, pas en dessous. Par conséquent, une fragmentation excessive du tepetate (pulvérisages, sarclages) en une fraction de moins de 2 mm favorise l'encroûtement, le ruissellement et l'érosion. Contrairement à ce que l'on pensait, le tepetate labouré n'est pas stable, même sous couvert de maïs ; les agrégats diminuent de taille, ceux inférieurs à 2 mm fondent, le matériau se tasse et s'encroûte. Il faut limiter au mieux la fragmentation, en évitant de pulvériser ; d'autres appareils et méthodes sont à expérimenter. La méthode mexicaine de billonnage du maïs, en trois opérations successives de labour, de sarclage et de buttage, en intensifiant la fragmentation, est donc dangereuse. Il conviendrait de faire le billon en une seule fois et de semer le maïs sur le billon. En outre, les billons devraient être cloisonnés, pour réduire les risques de rupture brutale lors de fortes pluies.

TABLEAU VI
Évolution de la porosité (P) et vitesse d'infiltration (Vi)
Evolution of the porosity (P) and infiltration velocity (Vi)

Période	1		2		3	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
Tepetate						
P (%)	58,1	53,2	57,7	54,3	51,1	50,6
Vi (mm/h) - sur billon	96	45	48	28	21	10
- sur sillon	52	16	24	12	8	2
Sol						
P (%)	56,4	50,9	55,3	51,5	50,0	48,9
Vi (mm/h) - sur billon	68	32	16	8	10	4
- sur sillon	52	0	12	2,4	5	0

Tepetate initial : P = 44 % ; Vi = 0,3 à 0,5 mm/h.

Dans le cas du tepetate cultivé, mais non billonné et laissé à nu, la surface initialement motteuse se couvre progressivement d'une croûte structurale par fonte des agrégats fins ; puis une croûte de dépôt se forme dans les petites dépressions. Le ruissellement augmente et la surface se couvre de fines griffes d'érosion, qui s'approfondissent lors de fortes pluies ; l'érosion s'accroît. Sans façons culturales, le tepetate cultivé devient donc facilement érodible par les fortes pluies.

SUIVI AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITÉ

Les analyses préalables du tepetate en laboratoire et une expérimentation en serre ont montré que ce matériau présente des contraintes qui sont responsables de sa stérilité : trop faibles macroporosité et conductivité hydraulique, carence en matière organique, azote et phosphore, ainsi qu'en micro-organismes symbiotes de certaines plantes cultivées (maïs, haricot). Mais il a aussi des propriétés favorables à la régénération d'un sol fertile : 30 à 40 % d'argile, soit (après amélioration structurale) une bonne rétention de l'eau et des éléments utiles à la plante, une microporosité importante et une assez bonne stabilité structurale ; ainsi qu'un pH neutre ou faiblement alcalin, une teneur suffisante en éléments Ca, Mg, K et oligo-éléments. C'est pourquoi la réhabilitation d'un sol agricole peut être rapide, rentable et durable, après le rétablissement d'une bonne structure, et à l'aide d'une fertilisation modérée en N et P (suivant les besoins de la plante) et, si possible, d'une fumure organique.

La récupération agricole des tepetates était pratiquée à l'époque préhispanique, mais manuellement, avec des amendements organiques, et déjà en terrasses antiérosives (*metepantles*). Ce travail, après avoir été délaissé, est devenu d'actualité ; il est maintenant mécanisé, les cultu-

res et techniques de fertilisation ont changé. Afin d'évaluer les méthodes, la productivité et l'intérêt économique, nous avons réalisé un suivi agronomique sur des parcelles expérimentales (MARQUEZ *et al.*, 1992), ainsi que des observations et une enquête socio-économique chez les paysans (ZAHONERO, 1992). Nous ne présenterons que les principales conclusions concernant l'évolution de la productivité en fonction du temps de culture et la rentabilité de cette réhabilitation.

Évolution de la productivité

La fertilité et la productivité augmentent jusqu'à un niveau normal en seulement trois à cinq années de culture. Mais toutes les plantes n'ont pas la même aptitude en première année : le maïs et le haricot produisent peu, même sur un sol de tepetate bien ameubli et fertilisé, alors que le blé et la vesce ont un rendement normal. C'est pourquoi une expérimentation systématique a été conduite en première année. En outre, des observations ont été faites sur des parcelles remises en culture depuis deux à cinq années et plus (NAVARRO et ZEBROWSKI, 1992 ; MARQUEZ *et al.*, 1992).

En première année de culture, nous avons comparé quatre plantes traditionnelles : blé, maïs, haricot et fève, ainsi que la vesce, susceptible d'être cultivée comme engrais vert. Nous avons testé l'effet d'une texture fine (50 % de particules de moins de 2 mm) ou grossière, d'une fertilisation minérale seule (NP : 0-60/60-60/60-120), ou accompagnée de fumier (40 t/ha). Les résultats majeurs sont donnés dans le tableau VII et les figures 1 à 5.

Les tepetates cultivés peuvent donc produire dès la première année de culture, pour le blé, la vesce et la fève ; mais pas pour le maïs et le haricot. Il est nécessaire de préparer une texture assez fine (< 2 mm). Mais nous avons vu que cela présente un risque d'érodibilité important.

TABLEAU VII
Rendement des cultures sur tepetate (t/ha)
Yields of different crops on tepetate (t/ha)

	Maïs	Haricot	Fève	Blé	Vesce
1 ^{re} année ⁽¹⁾	0-0,2	0,1-0,2	0,3-0,8	2-4 *	2-4 **
3 ^e année ⁽¹⁾	2,2-2,5	-	-	1,5	-
5 ^e année ⁽¹⁾	2,5-3,1	-	-	-	-
Moyenne ⁽²⁾	1,8	0,75	1,33	2	-

(1) Année de culture depuis la « roturation »; avec fertilisation minérale sans fumure organique.

(2) Moyenne des rendements de la région.

* Blé sur parcelles expérimentales et texture fine ; sur les autres parcelles, 1,2 t/ha (moyenne, 1,5 t/ha).

** Vesce sur parcelles expérimentales, rendement en matière sèche.

Sans apport de fumier, une terre fine et une fertilisation minérale modérée de N 120 et P 60 permettent de produire 4 t/ha de blé, 4 t/ha de vesce et 0,4 t/ha de fève. Avec apport de fumier et 60 unités de P (sans complément d'azote), le blé peut produire 6 t/ha, la vesce 6 t/ha et la fève 0,8 t/ha. Dans ce cas, une fertilisation azotée est inutile, voire dépressive, pour le blé.

L'échec de la culture de maïs et de haricot en première année semble dû à une carence ou déficience en micro-organismes symbiotes, nécessaires à la bonne nutrition de la plante (ALVAREZ-SOLIS *et al.*, 1992 ; Ferrera, 1993, comm. pers.).

En vue de résoudre le problème de la fertilisation organique des tepetates avec *roturación*, en l'absence de fumier ou de compost, la vesce ou une graminée fourragère (avoine) pourraient être utilisées comme engrais vert. L'insémination de symbiotes spécifiques permettrait un bon rendement du maïs et du haricot.

En deuxième année, sur une parcelle expérimentale, sans fumure organique mais avec une fumure minérale (N 120, P 80), le maïs a produit de 1,2 à 1,7 t/ha. En troisième année, les rendements du maïs (variété locale) sont de 2,2 à 2,5 t/ha et en cinquième année ils atteignent 2,5 à 3,1 t/ha. La productivité est donc bonne pour cette région (moyenne de 1,8 t/ha).

Rentabilité de la réhabilitation agricole d'un tepetate

Une enquête sur les « systèmes économiques familiaux » (ZAHONERO, 1992) a révélé que les tepetates réhabilités représentent une ressource en terre agricole importante, voire nécessaire, pour les petites exploitations de moins de 20 ha par famille. Grâce à des aménagements en terrasse, on obtient une bonne protection contre l'érosion. La rotation culturale est adaptée suivant l'âge de remise en culture : blé en première année, puis maïs-fève-

haricot. Progressivement, les cultures de subsistance (maïs, fève, haricot) prédominent sur les cultures de rente (blé, orge).

La productivité devient normale dès la troisième année de culture. Cela permet d'amortir le coût du travail de réhabilitation (coût assumé par le paysan, compte tenu d'une aide de l'État) en huit années normales. La rentabilité des investissements financiers sans l'aide de l'État est discutable pour des exploitations de moins de 15 ha, qui vivent en autosubsistance et ne peuvent dégager le capital nécessaire, à moins de bénéficier d'un apport de salaire extérieur. Dans le cas d'exploitations de plus de 15 ha, des cultures de rente (blé, orge) peuvent favoriser l'acquisition du capital nécessaire. De toute manière, il faudra l'aide de l'État pour fournir la prestation de travaux à moindre coût.

CONCLUSION

L'ensemble des résultats montre que les tepetates de type fragipan, après un aménagement adapté, constituent une ressource agricole durable et de bonne productivité. Cette ressource est quasi nécessaire pour les exploitations de moins de 20 ha par famille.

Les pluies érosives dans les régions de Mexico et de Tlaxcala sont peu nombreuses. Le tepetate ayant été soumis à une *roturación* est assez stable et peu érodible si l'on évite une fragmentation trop fine (moins de 2 mm).

L'effet du billonnage en culture de maïs est très efficace en station peu érosive, mais il est insuffisant en cas de pluies très érosives ($I_{30} > 50$ mm/h). Sans billonnage ni couvert végétal, le tepetate cultivé devient rapidement instable et très érodible. La répétition des façons culturales (labour plus deux travaux de sarclage et buttage pour le maïs au Mexique) accélère la fonte des agrégats, la formation d'une croûte, le ruissellement et l'érosion. Il faut

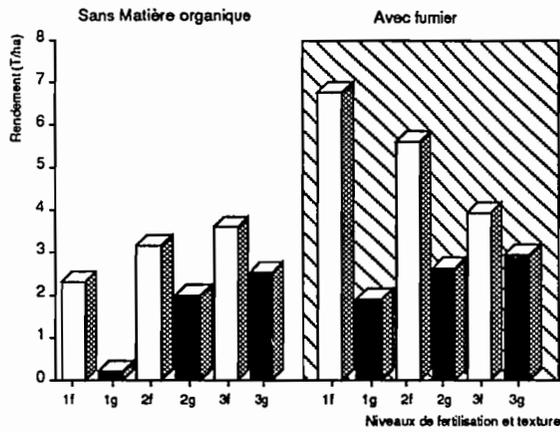


FIG. 1. — Influence des traitements sur le rendement du blé (première année).
Influence of treatments on the wheat yield (first year).

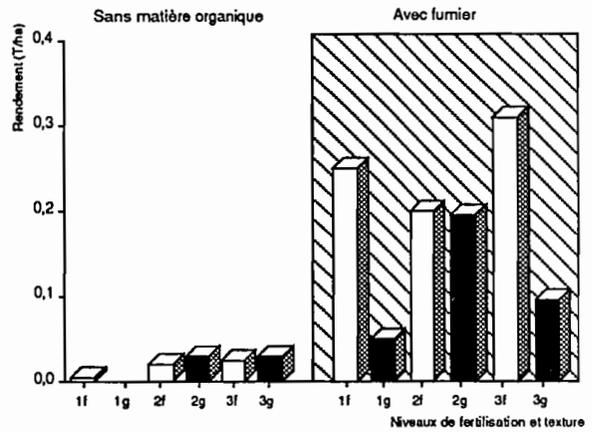


FIG. 2. — Influence des traitements sur le rendement du maïs (première année).
Influence of treatments on the maize yield (first year).

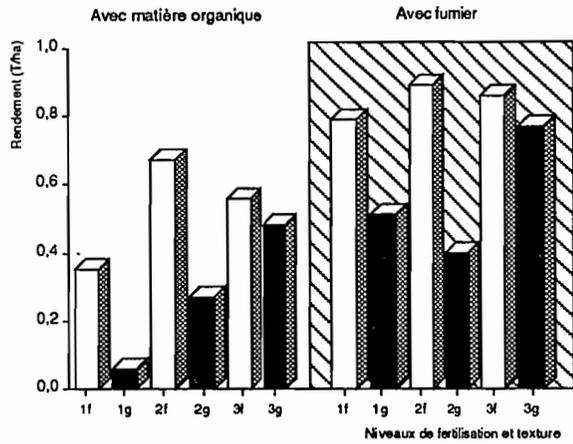


FIG. 3. — Influence des traitements sur le rendement de la fève (première année).
Influence of treatments on the broad bean yield (first year).

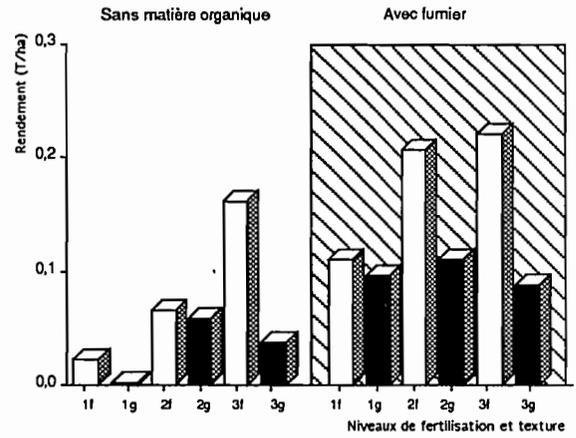


FIG. 4. — Influence des traitements sur le rendement du haricot (première année).
Influence of treatments on the bean yield (first year).

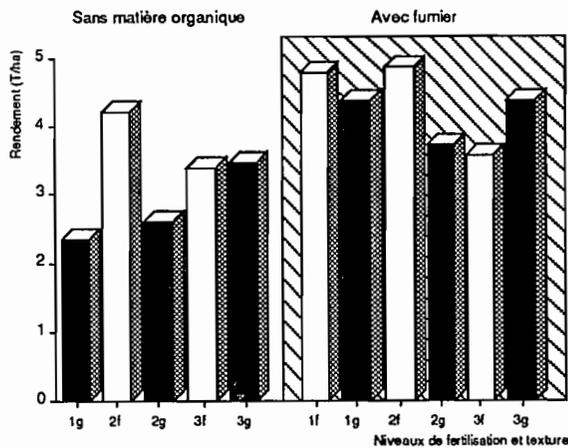


FIG. 5. — Influence des traitements sur le rendement de la vesce (première année).
Influence of treatments on the vetch yield (first year).

Texture
 □ fine
 ■ grossière

Niveaux de fertilisation (NPK)
 1 = 0 - 60 - 0
 2 = 60 - 0
 3 = 120 - 60 - 0

donc limiter la fragmentation du tepetate et la fréquence du travail du sol. En outre, il faut réaliser des billons cloisonnés, afin de réduire les risques d'érosion lors de fortes pluies.

Un tepetate, après *roturación* et amendement par une fertilisation minérale modérée (N 60 à 120, P 60) ou organique (fumier + P 60), peut être productif dès la première année pour certaines plantes telles que le blé et la vesce, moins pour la fève ; mais pas pour le maïs et le

haricot, sans doute par carence de micro-organismes symbiotes. Cependant, le rendement du maïs est normal dès la troisième année et devient optimal en cinq ans. Un amendement organique (fumier ou engrais vert) et l'insémination de symbiotes pourraient accélérer ce processus. L'opération est rentable malgré le coût des travaux qui peut être amorti en huit ans ; cela suppose une aide substantielle de l'État (travaux à moindre coût, prêt à intérêt réduit), surtout pour les petites exploitations.

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ-SOLIS (J. D.), FERRERA-CERRATO (R.), ZEBROWSKI (C.), 1992 — Analisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra*, 10 (num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 419-424.
- BAUMANN (J.), 1992 — *Investigaciones sobre la erodibilidad y el regimen hídrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el bloque de Tlaxcala*. Rapport final du contrat CEE n° TS2-A212C, 26 p.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989 — *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 232 p.
- CUSTODE (E.), DE NONI (G.), TRUJILLO (G.), VIENNOT (M.), 1992 — La cangahua en el Ecuador : caractérisación morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión. *Terra*, 10 (Num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 332-346.
- HIDALGO (C.), 1995 — *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques, de la Vallée de Mexico*. Thèse Univ. Nancy I, Paris 1996, Orstom, TDM n° 146, 215 p.
- JÉROME (G.), 1992 — *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate, dans la vallée de Texcoco, Mexique. Comparaison avec un sol non induré*. Mémoire fin d'études, Inst. Sup. Tech. Outre-Mer, 104 p.
- LAL (R.), 1976 — Soil erosion in Alfisols in Western Nigeria. 3 — Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16 : 389-401.
- MARQUEZ (A.), ZEBROWSKI (C.), NAVARRO (H.), 1992 — Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra*, 10 (Num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 465-473.
- NAVARRO (H.), ZEBROWSKI (C.), 1992 — *Étude des sols volcaniques indurés (tepetates) des bassins de Mexico et Tlaxcala (Mexique), leur production agricole*. Rapport final du contrat CEE n° TS2-A212C.
- PRAT (C.), OROPEZA (J.-L.), JANEAU (J.-L.), 1993 — « Resultados del primer año de investigación del programa Orstom-CP sobre la rehabilitación de los tepetates de Mexico ». Actas XII^e Congr. Lat. Amer. Ciencia del Suelo, Salamanca, 1994, vol. III : 1367-71.
- QUANTIN (P.), 1992 — *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des Bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*. Rapport scientifique final du contrat CEE n° TS2-A212C, 77 p.
- ROOSE (E.), 1981 — *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 130, 569 p.
- WISCHMEIER (W. H.), 1958 — Rainfall energy and its relationships to soil loss. *Trans. Amer. Geogr. Union*, 39 : 285-292.
- ZAHONERO (P.), 1992 — *Des lits de pierre sur l'Altiplano. Contribution à l'analyse de la mise en valeur des « tepetates », sols indurés d'origine volcanique, dans la région de Tlaxcala*. Rapport de fin d'études, CPSL/Orstom, 120 p.

Réhabilitation de sols volcaniques dégradés à l'aide d'amendements organiques au Salvador (Amérique centrale)

Jean COLLINET (1) et Manuel MAZARIEGO (2)

(1) Orstom/Catie, Costa Rica.

(2) Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Salvador.

RÉSUMÉ

*Au Salvador (Amérique centrale), de nombreux sols différenciés sur cendres et ponces volcaniques du quaternaire ont disparu du fait d'une forte érosion d'origine anthropique. On restaure actuellement ces matériaux en incorporant des amendements organiques de différentes origines. L'évolution des taux de matière organique et la reconstruction d'un complexe absorbant sont suivies sur sept parcelles expérimentales de 400 m² installées en milieu paysan. Les premières années, le traitement le plus intéressant pour les rendements du maïs a été le fumier de poule ; mais il apparaît maintenant que l'incorporation de matière végétale fraîche provenant d'une légumineuse, *Gliricidia sepium*, est la meilleure méthode pour reconstruire un complexe absorbant, tout en permettant des rendements de plus en plus proches de ceux des parcelles ayant reçu un amendement d'origine animale. Cette voie est d'autant plus intéressante que *Gliricidia sepium* peut facilement être produite par les paysans de la région. Elle contribuerait également à la conservation générale du bassin versant.*

MOTS CLÉS : Amérique centrale — Sols volcaniques — Matière organique — Amendements organiques — Complexe absorbant — Capacité d'échange — Réhabilitation des sols — Érosion hydrique — Glissement de terrain.

ABSTRACT

REHABILITATION OF VOLCANIC SOILS DEGRADED BY ANTHROPIC EROSION
WITH DIFFERENT TYPES OF ORGANIC FERTILIZERS IN EL SALVADOR (CENTRAL AMERICA)

*The soils over quarternary volcanic ashes of cultivated slopes of the mountains of El Salvador (Central America) have almost disapeared due to erosion. Among the actions taken for rehabilitation we propose the reconstruction of soils by incorporating different types of organic fertilizers. This reconstruction is controled experimentally over seven plots of 400 m² installed on farmers land. The results are analysed by considering together corn yield, the erosion, and the pre-soils evolution following the amount of organic matter and the capacity of cationic exchange. The most efficient treatment over the corn yield is the incorporation of 15 t/ha/year of chicken manure. The most profitable treatment for the farmer, still acceptable for the erosion, the best for reconstructing the adsorbing complex is an incorporation of 18 t/ha/year of fresh vegetative matter coming from the green manure of *Gliricidia sepium*.*

KEYWORDS : Central America — Volcanic soils — Organic matter — Organic fertilizers — Absorbing complex — Exchange capacity — Soil rehabilitation — Water erosion — Landslide.

RESUMEN

REHABILITACIÓN DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DEGRADADOS CON ABONOS ORGÁNICOS
(EL SALVADOR, AMÉRICA CENTRAL)

Numerosos suelos diferenciados sobre cenizas y pumitas volcánicas del cuaternario en El Salvador (América central) han desaparecido debido a una erosión fuerte de origen antrópico. En la época actual, se restauran esos materiales incorporando abonos orgánicos de diferentes orígenes. Se observan la evolución de las tasas de materia orgánica y la reconstitución de un complejo absorbente sobre siete parcelas experimentales de 400 m² en el área rural. Durante los primeros años, el tratamiento más interesante para el maíz fue las deyecciones de gallinas, pero hoy en día parece que la introducción de materia vegetal fresca proveniente de una leguminosa *Gliricidia sepium* es la más capaz de reconstituir un complejo absorbente mientras permite obtener rendimientos cada vez más cercanos a los de las parcelas tratadas con un abono de origen animal. También es interesante esa introducción de *Gliricidia sepium* en el suelo porque esa planta puede ser producida fácilmente por los campesinos de la región. También contribuye a la conservación general de la cuenca hidrográfica.

PALABRAS CLAVES : América central — Suelos volcánicos — Materia orgánica — Abonos orgánicos — Complejo absorbente — Capacidad de cambio — Rehabilitación de suelos — Erosión hídrica — Deslizamientos de tierras.

INTRODUCTION

Le Salvador est un pays de l'isthme centro-américain (fig. 1) qui abrite 5 millions d'habitants sur une superficie de 21 000 km². Depuis une quinzaine d'années, la sur-exploitation des sols aux environs de la capitale a dépassé le seuil de durabilité des systèmes agraires. En effet, les troubles qu'a connus le pays furent à l'origine de déplacements de population du nord vers le sud, et particulièrement dans la région de Tonacatépequé, objet de notre étude. La paix règne depuis 1992 mais seule une partie des « déguerpis » a regagné son Nord d'origine. Aussi la densité de population reste-t-elle très forte dans la zone considérée et elle dépasse probablement 500 habitants au kilomètre carré. Dans les pires situations, les produits vivriers de base (maïs et haricot) se cultivent directement sur des cendres et ponces volcaniques, sur des pentes pouvant atteindre 45 %.

L'opération de recherche, dont les premiers résultats sont résumés ici, s'inscrit dans un vaste programme régional et interinstitutionnel (CEL-MAG-Catie-Usaid) (1) intitulé « Réhabilitation du sous-bassin versant de la rivière Las Cañas ».

Nos collègues y mettent en œuvre, avec le concours des populations locales, différents moyens de restauration, qu'il s'agisse d'aménagements physiques (fossés de drainage associés à des talus enherbés ou arborés, *Gliricidia sepium* et divers fruitiers), de reforestation, de correction de torrents ou encore d'actions sociales auprès des femmes

pour un jardinage proche de l'habitation, pour une amélioration de l'hygiène, et surtout la construction de foyers domestiques (*estufas-lorena*) économisant 40 % de bois de chauffage, pour ne citer que les actions les plus visibles.

Dans ce même programme, nous nous sommes investis dans une action de réhabilitation des sols à partir de cendres et ponces volcaniques en utilisant différentes sources de matière organique disponibles localement.

Les premières reconnaissances (contacts avec les paysans et avec les instances locales, étude des sites possibles, des sols, levé topographique, etc.) se sont déroulées de fin 1990 à mi-1991. L'installation du dispositif a duré jusqu'à fin 1991. Les résultats présentés ici proviennent des cycles culturaux 1992, 1993, 1994 et en partie 1995. Cette opération devait se terminer fin 1995.

OBJECTIFS

Selon la CEL, le sous-bassin de la rivière Las Cañas (superficie de 76 km²), affluent du río Acelhuaté (733 km²), puis du río Lempa, fournit à lui seul 25 % des sédiments qui comblent peu à peu le « Cerrón Grande », qui est le plus grand barrage de production hydroélectrique, au nord-ouest du Salvador (2 100 km²), avec un volume utile de 378 millions de mètres cubes. On y a calculé une sédimentation proche de 50 millions de tonnes par an. Cette sédimentation provient d'une érosion spécifique de 250 t/ha dans le grand bassin versant du río Lempa.

(1) CEL : Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (agence de bassin). MAG : Ministerio de Agricultura y Ganadería (Salvador). Catie : Centro Agronómica de Investigación y Enseñanza. Usaid : United States Agency for International Development.

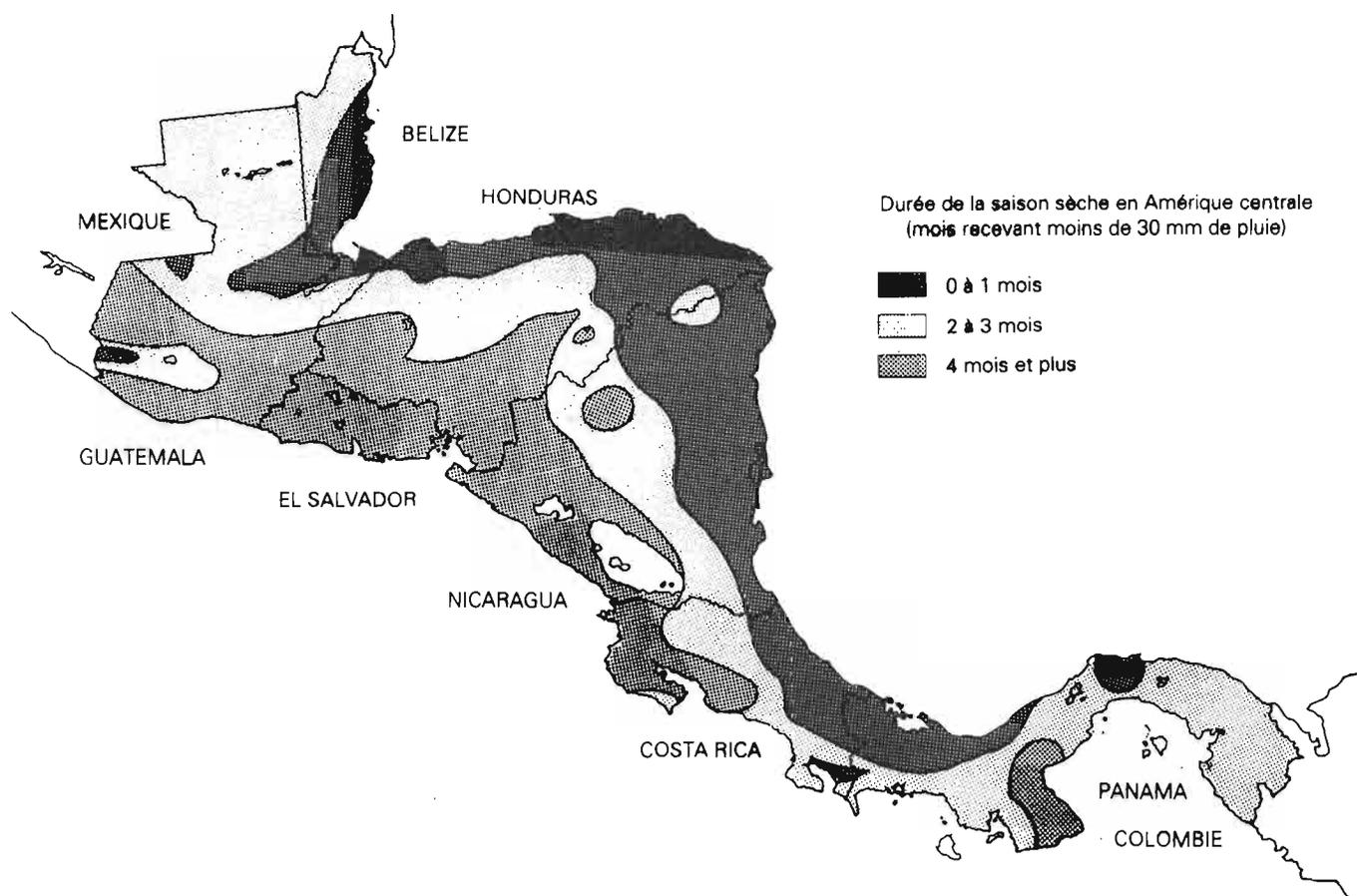


FIG. 1. — Carte de localisation du Salvador, climats en Amérique centrale.
Situation map of El Salvador, climates in Central America.

L'érosion spécifique du sous-bassin du río Las Cañas atteindrait, selon la CEL, des quantités allant jusqu'à 350 t/ha, valeurs compatibles avec celles calculées par CASTILLO (1992) et avec celles mesurées au champ (COLLINET et MAZARIEGO, 1993), comme on le verra plus loin. Il est certain que cette érosion fait partie des très fortes abrasions en cordillère volcanique d'Amérique centrale.

C'est dans ce contexte que notre opération s'est fixé les trois objectifs suivants :

- augmenter la productivité des terres en cultures vivrières pour diminuer la pression des populations paysannes sur les pentes les plus fragiles ;

- contribuer à une augmentation de la capacité de stockage hydrique des pluies par le bassin versant, tout en contrôlant l'équilibre entre les risques d'érosion par flux superficiels et ceux de glissement de terrain par surcharge hydrique profonde ;

- faire en sorte que les moyens proposés soient réalisés dans le contexte de l'actuel niveau d'investissement du

monde paysan salvadorien (produit par habitant, en 1990, de 521 dollars US).

LES MILIEUX NATURELS ET ANTHROPISÉS

Le diagramme de la figure 2 décrit un paysage disséqué dans 50 à 80 m de cendres, ponces et tufs provenant d'activités volcaniques du quaternaire.

Un des paroxysmes de l'activité volcanique à l'origine des cendres et ponces fut probablement l'explosion qui forma, il y a environ 15 000 ans, l'énorme caldeira de l'Ilopango, actuellement lac de cratère au sud-est de la capitale San Salvador. Les altitudes limites en amont et en aval du bassin versant vont de 700 m à 470 m, la zone étudiée se situant à 600 m. Dans ces cendres et ponces, il n'est pas rare de rencontrer d'anciens horizons organiques enterrés un peu plus cohérents que le reste des matériaux.

La zone étudiée appartient à la zone climatique tropicale semi-humide. Les précipitations annuelles atteignent

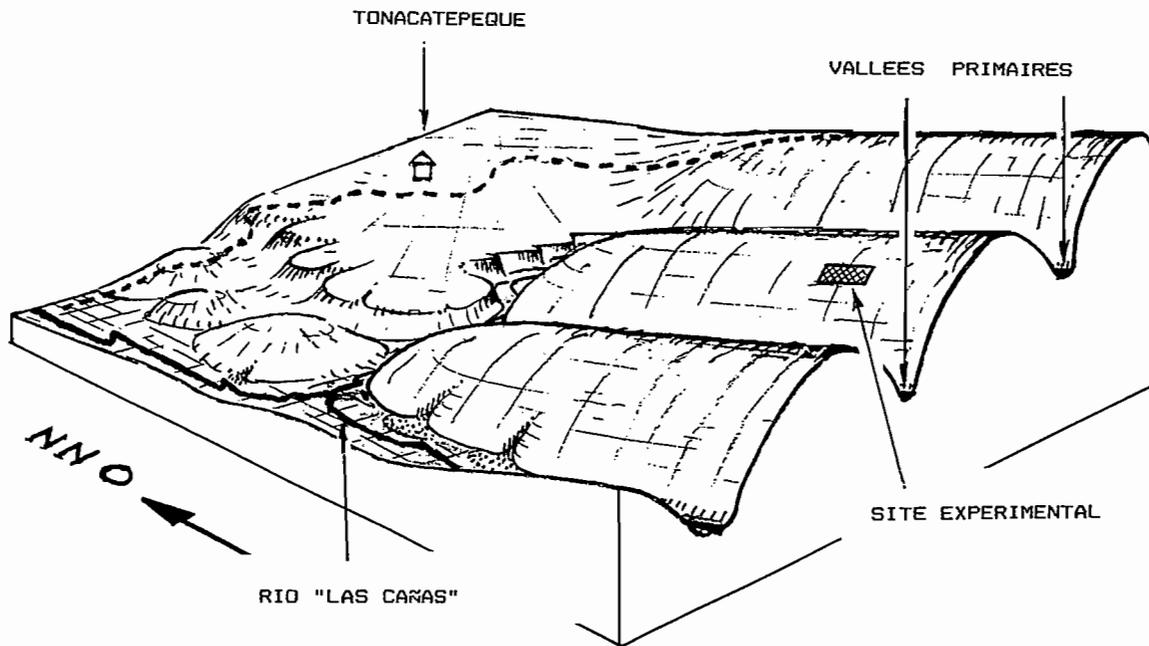


FIG. 2. — Bassin versant de « Las Cañas », paysages, localisation du site expérimental.
Drainage basin of « Las Cañas », landscapes, situation of the experimental site.

1 600 mm à Tonacatépequé, localité proche, où 80 % des pluies tombent entre mai et octobre. On note, environ une année sur trois, une nette diminution des précipitations en juillet. Ce phénomène dénommé localement « *canicula* » est particulièrement perturbant, dans toute l'Amérique centrale, pour les cultures qui sont alors en pleine croissance.

Sans une déforestation intense, cette région appartiendrait au climat « Forêt tropicale caducifoliées » (bmh-ST du système « *zona de vida* » de HOLDRIDGE, 1967). Selon MEDRANO (1990), l'utilisation actuelle de la terre dans ce bassin versant du río Las Cañas est la suivante :

- 18 % de zones urbanisées et d'eaux libres ;
- 38 % de zones cultivées dont 11 % de caféières et de plantations fruitières, 5 % de canne à sucre, 22 % de

maïs et haricot (tabac très fluctuant d'une année sur l'autre) ;

- 19 % de friches et pâturages ;
- 25 % de galeries forestières sur les pentes supérieures à 50 % et dans les ravins.

Les zones les moins déclives (pente inférieure à 15 %) correspondent au plateau de Tonacatépequé (fig. 2) et aux crêtes des collines allongées. Elles représentent environ 50 % du bassin et supportent des sols peu érodés, le plus souvent cultivés par les autochtones en parcelles de 1,50 ha à 2,75 ha. Ce sont des vitrosols ou des andosols eutriques (Vitric ou Umbric Andosols de la FAO ; Ustivitrands ou Haplustands de l'USDA), brun sombre, épais, meubles, homogènes sur au moins 150 cm. Quelques informations analytiques sont présentées dans le tableau I (COLLINET et MEDRANO, 1991).

TABLEAU I
 Andosols eutriques des plateaux et versants peu pentus, friche à *Gliricidia sepium*
Eutric andosols in plateaux and gentle slopes, fallow land with Gliricidia sepium

	A	L	S	MO	C/N	pH	CEC	Sat.	CaMg/K	P total	P Olsen
5 cm	20	30	50	5,4	11	6,1	15,5	87	10	450	35
25 cm	35	20	45	2,4	11	6,0	16,0	77	7	325	16

A = argile, L = limon, S = sable (%); MO = matière organique (%); CEC = capacité d'échange cationique (cmol (+)/kg sol); Sat. = taux de saturation du complexe absorbant (%); CaMg/K = équilibre Ca + Mg par rapport K; P total = phosphore total (mg/kg sol); P Olsen = phosphore Olsen (mg/kg sol).

L'autre moitié de la superficie correspond aux versants dépassant 15 % de pente, qui sont généralement cultivés, sinon cultivables, jusqu'à des pentes atteignant 80 % près des « urbanisations précaires ». On y trouve des sols squelettiques à peu évolués régosoliques (Eutric Regosols de la FAO ; Ustarents à Ustropepts de l'USDA). L'épaisseur de ce qui est un sol est insignifiante à faible au-dessus des cendres ou des ponces du matériau originel qui affleure dans plus de 30 % des cas.

Cette situation provient de la combinaison d'érosions en nappe ou concentrée et de réajustements des versants aux profondes incisions torrentielles par érosion régressive et glissements de terrain latéraux. Cette zone est surtout exploitée par les « déguerpis » allochtones en parcelles de 0,5 à 1,5 ha.

Quelques caractères analytiques de ce second groupe de sols sont résumés dans le tableau II.

TABLEAU II
Sols squelettiques ou peu évolués d'érosion sur cendres et ponces, pentes de 25 à 35 %, maïs, haricot
Skeletal or weakly developed soils formed by erosion on ashes and pumices, slopes from 25 to 35 % maize, bean

	A	L	S	MO	C/N	pH	CEC	Sat.	CaMg/K	P total	P Olsen
5 cm	10	25	65	0,6	-	5,5	8,0	62	6	350	13
25 cm	15	30	55	0,4	-	5,6	10,0	62	9	250	5

A = argile, L = limon, S = sable (%); MO = matière organique (%); CEC = capacité d'échange cationique (cmol (+)/kg sol); Sat. = taux de saturation du complexe adsorbant (%); CaMg/K = équilibre Ca + Mg par rapport K; P total = phosphore total (mg/kg sol); P Olsen = phosphore Olsen (mg/kg sol).

La comparaison des deux situations montre que l'érosion sur les versants est à l'origine :

— de l'apparition d'une texture limono-sableuse proche de celle du matériau originel ;

— de la disparition quasi totale des horizons organiques ; il faut en effet enlever environ 100 à 150 cm aux sols des zones moins déclives avant de retrouver les matériaux qui affleurent sur les versants ;

— d'une nette diminution de la capacité d'échange cationique ;

— d'une possible mise à l'affleurement d'horizons organiques fossiles de couleur café à noire, à peu près inertes chimiquement, mais entretenant une ascension capillaire intéressante en saison de transition du fait de textures plus fines.

billonnage plus succinct a lieu vers le début de juillet en même temps que l'épandage de quelque 80 à 100 kg/ha de sulfate d'ammonium sur les flancs des billons.

La succession maïs-haricot est la règle générale. Le maïs (hybride Centa H3 ou H5) est semé immédiatement après le labour vers la mi-mai, les cannes sont pliées (*doblado*) à environ 20 cm sous l'épi vers le 20 août tandis que sont semés en poquet, au bâton ferré (*estaca*), les haricots sur les flancs des reliquats de billon. Cela permet le séchage au champ du maïs, hors de portée des rongeurs, et l'utilisation des cannes comme tuteurs pour le haricot. Épis de maïs sec, donc désormais attaquables par les insectes, et gousses de haricot sont récoltés en même temps entre fin octobre et mi-novembre. Les paysans les plus aisés utilisent quelques produits dés herbants et phytosanitaires.

LES PRATIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Le site expérimental, positionné sur la figure 2, est situé dans une des parties les plus dégradées de ce bassin versant, sur des pentes s'échelonnant entre 20 et 40 %, et sur des sols possédant à l'origine des caractéristiques correspondant à celles reprises dans le tableau II.

Le labour traditionnel se fait vers la mi-mai, avec deux bœufs tirant une araire qui griffe le sol sur une profondeur de 20 à 25 cm, selon un tracé approximativement isohypse. Les champs sont billonnés manuellement après la levée du maïs et un apport de 80 à 100 kg/ha d'engrais NPK (20-20-0). Le champ acquiert alors une rugosité régulière en billons de 85 à 110 cm d'écartement et de 25 à 30 cm de hauteur avant les premières fortes pluies. Un second

MÉTHODE

La méthode se fonde sur un suivi des évolutions des cultures (maïs, haricot) et des sols sur sept parcelles expérimentales de 400 m² installées en deux sites de 18 % et 30 % de pente, dans un champ de 1,5 ha appartenant à un paysan propriétaire qui effectue tous les gros travaux.

Deux parcelles (TEST) servent de témoins. Deux parcelles (ESTI) reçoivent 15 t/ha de fumier de poule enfoui à l'état sec à l'époque du labour. Ce fumier provient des nombreux élevages locaux de poulets approvisionnant les chaînes des restaurants populaires de la capitale.

Deux parcelles (MVFE) reçoivent 18 t/ha de fragments, secs à 30 %, de rameaux et feuilles de *Gliricidia sepium* (« Madreado » ou « Madre cacao » au Salvador), légumineuse arbustive servant jadis de plante d'ombrage dans les

caféières et qui a proliféré. FASSBENDER (1987) estime que ce végétal peut produire 8 à 10 t/ha/an de fragments utilisables au bout de cinq ans.

Une parcelle MVFS, sur le site dont la pente est de 30 %, reçoit la même quantité du même matériel végétal, mais cette fois épandu superficiellement après le semis du maïs.

Le protocole expérimental prévoit différentes opérations dont la nature et la fréquence durent s'adapter aux moyens du laboratoire d'analyse du Catie et à une disponibilité partielle pour cette opération. On effectue, tous les deux mois, des prélèvements agronomiques d'échantillons de terre à trois profondeurs, par trois sondages dans trois placettes de 4 m² tirées au sort dans chaque parcelle de 400 m². Les trois échantillons des prises à 0-10, 15-25, 30-40 cm sont regroupés pour chaque parcelle. Deux fois l'an, on procède également à des prélèvements de végétaux (épis, grains, gousses, tiges).

L'objectif, adapté au milieu et aux conditions du travail, est donc un suivi des effets des traitements sur les différentes parcelles et dans le temps :

— à court terme, c'est l'effet immédiat, dès le premier cycle de culture, où l'on peut espérer une amélioration sensible des rendements grâce aux éléments nutritifs N et P apportés par la matière organique et immédiatement utilisables ; il n'y a jamais de carence potassique dans ce type de matériau ;

— à moyen terme, probablement en trois ou quatre cycles, on devrait constater la construction d'un complexe d'échange par le suivi de la capacité d'échange cationique et des relations qui la lient aux taux de matière organique

et d'argiles (granulométriques) ; l'augmentation espérée, année par année, permettra non seulement de maintenir les éléments libérés par l'altération des cendres, mais aussi d'éviter le lessivage des quelques engrais minéraux apportés ;

— à long terme, il s'agit de la construction d'une structure dans le néo-sol par l'adjonction de composés organiques, la réactivation de la faune du sol, avec des résultats espérés sur la porosité et la stabilité des agrégats, donc sur le volet conservation physique *lato sensu*. Les premiers effets n'étaient guère attendus avant cinq cycles.

RÉSULTATS

Effets à court terme

Deux effets sont immédiats : sur les rendements, sur la protection contre l'érosion.

RENDEMENTS

Le tableau III donne les résultats des cycles 1992, 1993 et 1994 pour le maïs et 1993 pour le haricot.

Pour le maïs, les rendements dans les trois situations, ESTI, MVFE et MVFS, sont en constante augmentation depuis 1993. On note que la situation MVFE devient aussi intéressante que ESTI à partir de 1993. L'année 1994 a présenté un optimum pour les cultures du fait de l'absence de *canicula* petite saison sèche de juillet. Cela peut expliquer des rendements en 1994 particulièrement élevés sur les témoins TEST, ce qui occulte d'ailleurs l'augmentation particulièrement intéressante du rendement sur la parcelle MVFS.

TABLEAU III
Rendements du maïs en 1992, 1993, 1994 et du haricot en 1993, comparaison avec les témoins
Maize yields in 1992, 1993 and 1994, bean yield in 1993, comparison with controls

	Maïs 1992	Maïs 1993	Maïs 1994	Haricot 1993
TEST	2 170	3 904	5 522	1 850
ESTI	3 237 + 49%	5 585 + 43%	6 341 + 15%	1 500 - 19%
MVFE	3 023 + 38%	4 774 + 22%	7 346 + 33%	2 312 + 25%
MVFS	2 232 + 4%	4 234 + 8%	6 361 + 15%	2 425 + 31%

Rendement en kg/ha. Variété maïs H3, grains à 14 % de siccité.

TEST : témoin.

ESTI : fumier de poule enterré.

MVFE : fragments de *Gliricidia sepium* enterrés.

MVFS : fragments de *Gliricidia sepium* épandus en surface.

Pour le haricot, les rendements en MVFE et MVFS sont bons. On observe par contre un effondrement du rendement du haricot en 1993, les jeunes plants ayant été étouffés par les mauvaises herbes dont les semences furent apportées en même temps que le fumier de poule. Un passage en revue de la littérature permet d'évaluer dans quelles limites s'inscrivent ces résultats. On note, malheureusement, que les informations sont nettement plus fia-

bles en culture améliorée (la MAG et sa station Centa) qu'en culture traditionnelle où les rendements sont évalués assez approximativement (en sacs et dans un système d'unités locales parfois fluctuantes), sans appréciation de la siccité des récoltes. Concernant le maïs, MAG-CENTA (1988, 1989) indique, en culture traditionnelle, des rendements de 1 908 kg/ha, et environ 5 000 kg/ha en culture améliorée (variété H3). Dans la région « Amérique latine »,

le *World Resources 1990-1991* donne les rendements moyens « céréales » suivants : Amérique du Sud : 2 034 kg/ha ; Amérique centrale : 1 769 kg/ha.

L'amélioration des rendements est l'effet prévu par l'apport d'azote et de phosphore directement utilisables par la plante. Les teneurs en azote et en phosphore augmentent d'année en année (fig. 3) et les équilibres de ces deux éléments restent corrects dans la gamme d'acidité du sol. Cela est, évidemment, une conséquence directe de l'accroissement observé des taux de la matière organique des sols, qui sera abordé dans la partie traitant des effets à moyen terme.

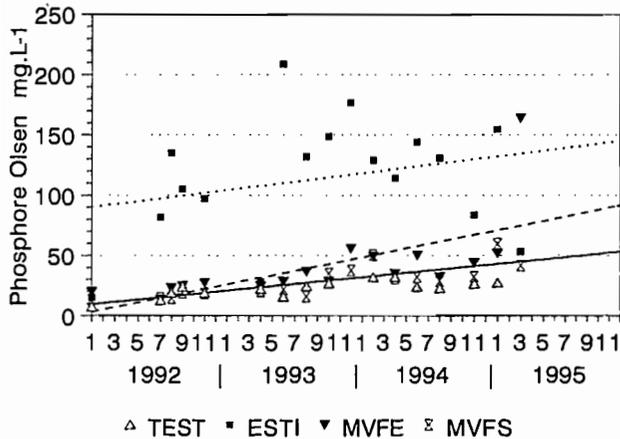


FIG. 3. — Évolution du phosphore Olsen.
Evolution of Olsen phosphorus.

PROTECTION CONTRE L'ÉROSION

L'amélioration des rendements n'est pas le seul effet intéressant, sur cendres volcaniques, des amendements organiques. Cette amélioration résulte aussi d'une augmentation de la dynamique de croissance des cannes et folioles, dès le mois de juillet sur les parcelles fumées ESTI. Elle est encore sensible sur MVFE mais moins nette sur MVFS. Cette augmentation de la dynamique de croissance, déjà effective lors des premières fortes précipitations de juin et juillet, assure une protection au niveau du sol contre l'énergie des pluies.

Dans la figure 4, on compare la mobilisation des terres en interbillons dans les quatre situations. La méthode permettant cette comparaison ne nécessite qu'une observation de terrain, à condition que celui-ci soit travaillé selon un motif répété, ce qui est notre cas.

On note immédiatement un effet protecteur important mais décroissant, dans l'ordre : ESTI > MVFE > MVFS > TEST.

Pour réaliser cette opération, on a besoin du poids de la terre détachée du billon et déposée dans chaque interbillon. Pour ce faire :

- on mesure le volume de terre accumulé interbillon par interbillon, soit : le côté de la parcelle (20 m ici) ; une évaluation codifiée de la densité des dépôts (0 à 3 pour 0 à 100 %) en créant une grille ; la mesure répétée (cinq fois sur 20 m) de la largeur du dépôt (c'est la seule opération qui nécessite un peu d'expérience pour différencier la partie remaniée de celle du sol labouré intact) ;

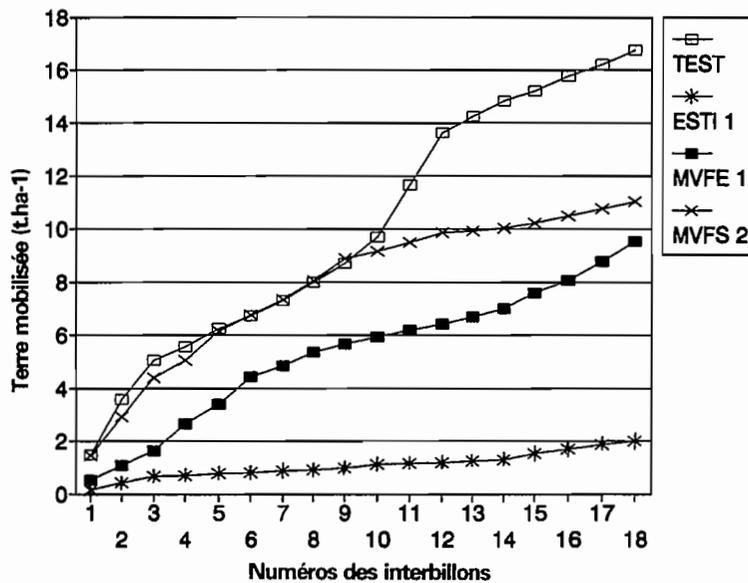


FIG. 4. — Mobilisation de la terre en interbillons.
Soil accumulation between ridges.

— on assimile ce volume à un parallélépipède rectangle ; cette approximation est suffisante pour la précision demandée ;

— avec la masse spécifique du sol, on passe du volume au poids, que l'on cumule interbillon par interbillon vers l'aval de la parcelle sur une distance tenant compte de l'équidistance du billonnage (ici : 18 à 19 billons dans 400 m²) ;

— on obtient une mobilisation de terre qui se rapproche donc plus d'une érosion potentielle que d'une érosion réelle.

On peut aussi évaluer l'érosion réelle, toujours dans les mêmes conditions de microreliefs ou de mésoreliefs en mailles répétitives, en suivant cette fois l'évolution d'une perte de volume des billons tout au long des averses tombant sur une surface peu protégée jusque début août, laps de temps pendant lequel se réalise 80 % de l'érosion annuelle, la couverture devenant ensuite très dense : mensuration des hauteurs, largeurs, fréquences des billons et interbillons dès la fin du premier buttage ; répétition de cette mesure tous les deux mois, par exemple.

On tentera, lors du prochain cycle, de substituer à ces mesures un coefficient qui est le rapport entre la longueur d'une chaîne développée librement selon la ligne de plus grande pente sur quelques billons et interbillons et la même distance mesurée avec la chaîne tendue.

Dans la figure 5, on compare les masses de terre mobilisées avec l'érosion réelle observée sur la parcelle MVFS ayant reçu, jusqu'au 22 juin 1994, 249 des 1 603 mm des pluies annuelles. On note que cette érosion, avec ouverture de billons (150 t/ha pour MVFS 2), représente dix à quinze fois la mobilisation liée au splash

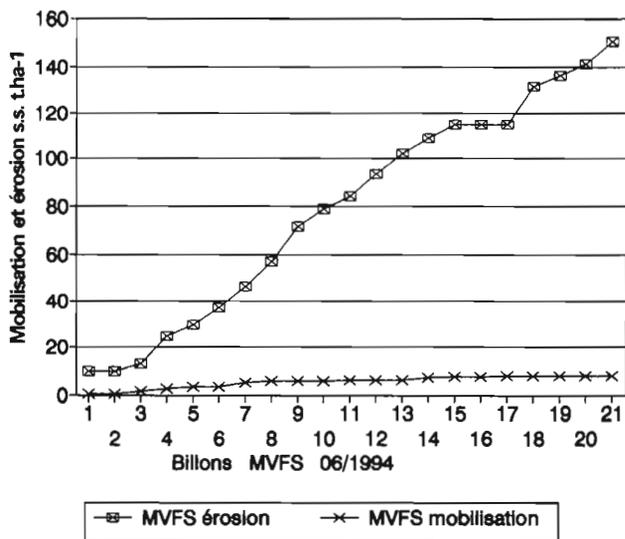


FIG. 5. — Érosion et mobilisation comparées des terres. Comparative soil erosion and accumulation.

et à une faible intervention de l'abrasion du flux hydrique se propageant latéralement dans des interbillons approximativement en courbe de niveau (10 t/ha sur la même parcelle). Ces chiffres, qui représentent des départs maximaux sur champ peu protégé de 30 % de pente, sont compatibles avec les données généralement publiées dans cette région.

Effets à moyen terme

La réhabilitation de ce néo-sol sur cendres et ponces passe par l'accumulation progressive de composés organiques. Si l'on admet que ceux-ci jouent un rôle positif dans l'édification du complexe d'échange, on peut alors espérer une augmentation progressive de la capacité d'échange du néo-sol. Ces effets à moyen terme ont été abordés selon deux niveaux d'analyse :

— à un premier niveau, on a supposé que l'hypothèse précédente pouvait être satisfaite ; aussi a-t-on suivi, les évolutions des éléments susceptibles d'interférer sur la capacité d'échange cationique (matière organique, argile, limon), et la capacité d'échange cationique elle-même (CEC) en fonction du temps ;

— à un second niveau, on vérifie la validité de l'hypothèse en faisant jouer les interactions entre les éléments dont on suppose le rôle dans l'amélioration de la capacité d'échange cationique. On analyse ainsi les relations CEC-argile, CEC-limon, CEC-matière organique et CEC-argile + matière organique.

ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Un exemple d'évolution des taux de matière organique est donné dans les figures 6 et 7. Une information complète sur les tendances pour toutes les situations est rapportée dans le tableau IV (ligne matière organique-temps).

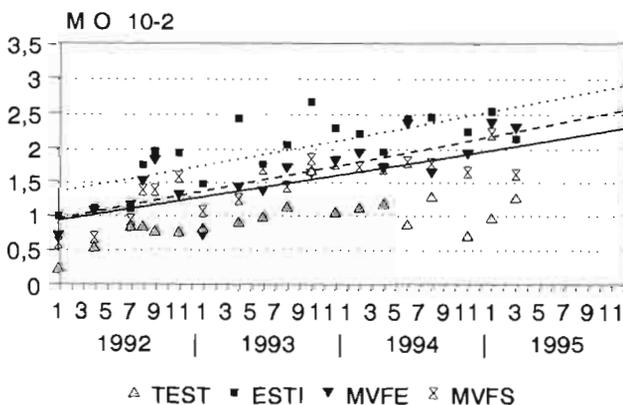


FIG. 6. — Évolution superficielle des taux de matière organique entre 1992 et 1995. Surface evolution of organic matter contents from 1992 to 1995.

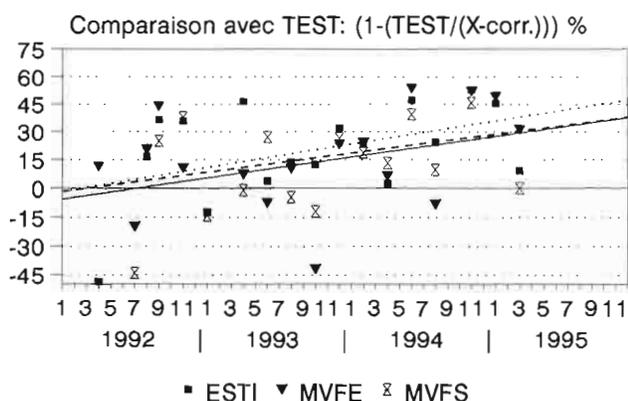


FIG. 7. — Évolution comparée avec le témoin du taux de matière organique entre 1992 et 1995.
Comparative evolution with the control of organic matter content from 1992 to 1995.

TABLEAU IV

Évolution des taux de matière organique (MO), d'argile granulométrique (AR) et de la capacité d'échange cationique (CEC) pendant 39 mois
Evolution of organic matter (MO), of grain-size clay contents (AR) and of the cation exchange capacity (CEC) during 39 months

Relation	Horizon (cm)	TEST 1+2	ESTI 1+2	MVFE1 1+2	MVFS 1+2
MO-temps	0-10	++	++	++	++
	15-25	+	0	+	++
	30-40	0	0	0	0
AR-temps	0-10	-	--	0	--
	15-25	-	0	0	0
	30-40	0	0	0	0
CEC-temps	0-10	-	+	0	-
	15-25	-	0	0	-
	30-40	-	0	0	+

Coefficient $r^2 > 0,300$: relation significative ++ ou --
 $0,100 < r^2 < 0,299$: tendance + ou -
 $r^2 < 0,099$: relation nulle 0

Sur 39 mois, les taux de matière organique augmentent en valeur absolue de 100 à 130 %, pour les vingt-cinq à trente premiers centimètres des parcelles ESTI, MVFE, MVFS. Il convient cependant de noter deux choses :

— les taux étaient particulièrement bas au départ : 0,3 à 0,7 % de matière organique sur les quinze premiers centimètres ;

— cette analyse n'indique qu'une tendance estompant les variations annuelles en limite de détection avec des prises d'échantillons bimestrielles, variations liées aux successions des apports, de la minéralisation, du lessivage des composés organiques récupérés (fumier) ou synthétisés.

Pour permettre des comparaisons entre une parcelle donnée et son témoin, des corrections sont nécessaires car les taux initiaux de matière organique des parcelles, avant leurs premiers traitements de 1992, étaient sensiblement différents.

Les comparaisons avec ces témoins (exemple de la figure 7) montrent, cette fois, des augmentations relatives de 30 à 35 % pour les dix premiers centimètres de ESTI, MVFE et MVFS.

Pour la tranche 15-25 cm, les taux n'augmentent que sur les parcelles ESTI et MVFE du premier site, un peu moins pentu.

Plus profondément (30-40 cm), les variations sont totalement indépendantes du temps, et ce pour des teneurs devenues faibles et comprises entre 0,2 et 0,7 % de matière organique.

L'accumulation progressive de composés organiques sur des cendres et la constitution de néo-horizons organo-minéraux est vérifiée au moins sur les premiers quinze à vingt-cinq centimètres au bout d'un peu plus de trois années d'essais.

ÉVOLUTION DE LA GRANULOMÉTRIE

Pour isoler le rôle que peuvent tenir les argiles, voire les limons, dans la construction du complexe d'échange, deux points ont été vérifiés : les modifications texturales avec le temps, ce que les travaux des champs pourraient finalement laisser supposer ; les interactions entre la CEC et les argiles et limons (elles seront analysées plus loin).

Les éventuelles modifications texturales reposent sur une évaluation correcte des situations initiales par parcelle. Or l'interprétation des cartes d'isovaleurs texturales par tranche de sol (logiciel Surfer) montre de sérieuses hétérogénéités liées à la présence d'horizons fossiles plus argileux pouvant affleurer du fait de l'érosion générale. Certes, cela se traduit par des effets intéressants pour l'hydrodynamique car les cultures profitent manifestement de remontées capillaires plus importantes et durables à l'aplomb de ces « taches » à texture plus fine. Malheureusement, cela entraîne également une plus grande complexité dans l'interprétation des données.

L'analyse des variations granulométriques des argiles et des limons avec le temps ne donne que peu d'informations durables — si ce n'est la détection d'une érosion en nappe — sur les parcelles TEST 1, ESTI et MVFS 2 (tabl. IV, ligne argile-temps). Il est certain que ce processus est omniprésent mais il est également vraisemblable que ses effets peuvent être soit amplifiés (fig. 8), soit atténués (fig. 9) par des « remontées » d'horizons fossiles de texture plus fine ou plus grossière.

On pourra donc difficilement tirer argument de ces évolutions granulométriques, apparemment aléatoires, pour l'interprétation des variations de la CEC liées aux colloïdes.

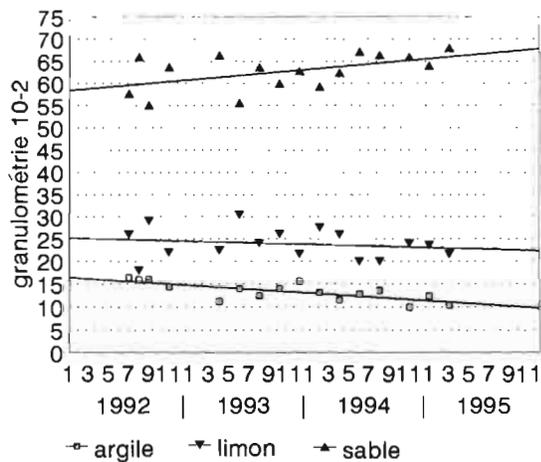


FIG. 8. — Évolution des textures entre 1992 et 1995, exemple de la parcelle ESTI.
Evolution of textures from 1992 to 1995, example of the ESTI plot.

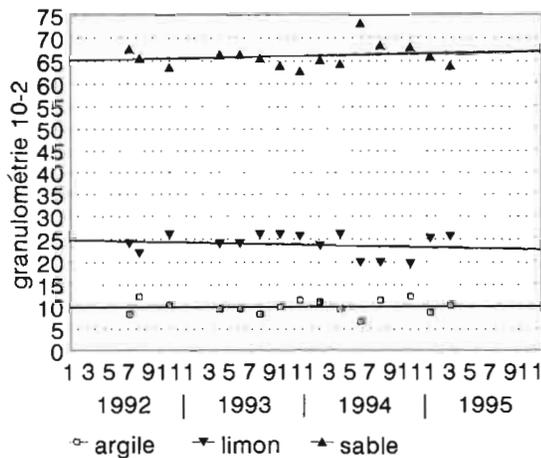


FIG. 9. — Évolution des textures entre 1992 et 1995, exemple de la parcelle MVFE.
Evolution of textures from 1992 to 1995, example of the MVFE plot.

ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE

Les CEC initiales de ces matériaux variaient de 8 (surface) à 10 cmol(+)/kg de terre (profondeur), valeurs faibles rappelant celles d'anciens sols ferrallitiques désaturés de pénéplaines intertropicales.

On peut espérer, plus à long terme qu'à moyen terme, faire remonter ces CEC jusqu'aux valeurs de sols non dégradés sur les mêmes matériaux, à savoir atteindre 15 à 16 cmol(+)/kg de terre.

Sans pouvoir miser sur des variations significatives des taux d'argile, mais avec la seule croissance, observée précédemment, des taux de matière organique, on devrait

observer une amélioration de la CEC avec le temps, si toutefois les composés organiques synthétisés influent positivement sur la construction d'un complexe d'échange.

L'hypothèse d'une nette remontée de la CEC avec le temps n'est pas réellement vérifiée, ce que montrent les exemples des figures 10 et 11, ainsi que les tendances apparaissant dans le tableau IV (ligne CEC-temps).

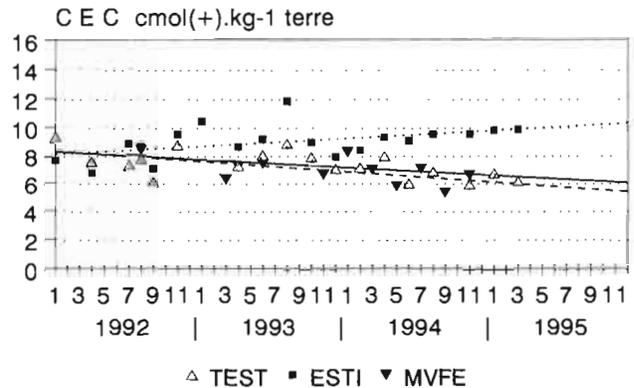


FIG. 10. — Évolution de la capacité d'échange de plusieurs parcelles, en surface, entre 1992 et 1995.
Evolution of exchange capacity in all plots from 1992 to 1995 at a shallow depth.

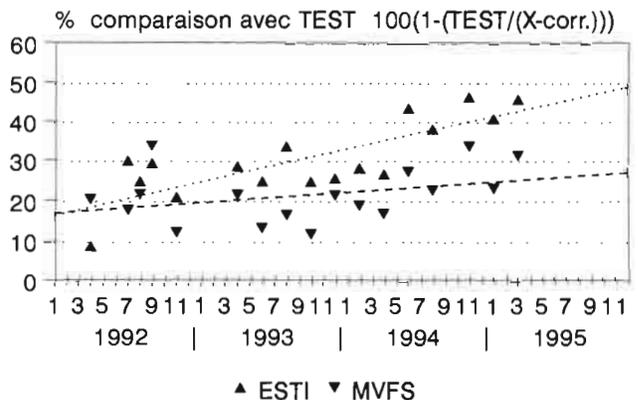


FIG. 11. — Évolution comparée avec le témoin des capacités d'échange de plusieurs parcelles, en surface, entre 1992 et 1995.
Comparative evolution with the control of exchange capacities in all plots from 1992 to 1995 at a shallow depth.

Seules les surfaces des parcelles ESTI montrent une amélioration de cette capacité d'échange cationique avec le temps.

Tout au long des 39 mois, la CEC diminue significativement sur les parcelles TEST ne recevant que les maigres résidus de récolte abondamment pâturés à partir du mois de novembre.

On ne constate généralement pas ou peu de modifications de la CEC sur les parcelles MVFE, quelle que soit la profondeur. Dans ce dernier cas, il faut donc considérer que, comparé au témoin, ce traitement permet au moins de maintenir un complexe absorbant en son état initial.

VÉRIFICATION DES INTERACTIONS

Relation entre CEC et taux d'argile et de limon

Les exemples des figures 12 et 13 ainsi que le tableau V (ligne CEC-argile) montrent une croissance très significative et générale (sauf ESTI, 0-10 cm) de la capacité d'échange cationique avec les taux d'argile. Cela est classique en ce qui concerne le rôle des argiles ; la participation des limons à l'accroissement de la CEC l'est moins.

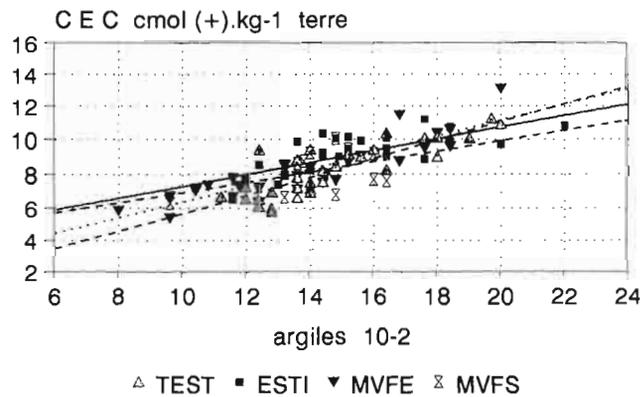


FIG. 12. — Relation entre la capacité d'échange et le taux d'argile, pour toutes les parcelles, entre 15 et 25 cm. Relation between the exchange capacity and clay in all plots, from 15 to 25 cm deep.

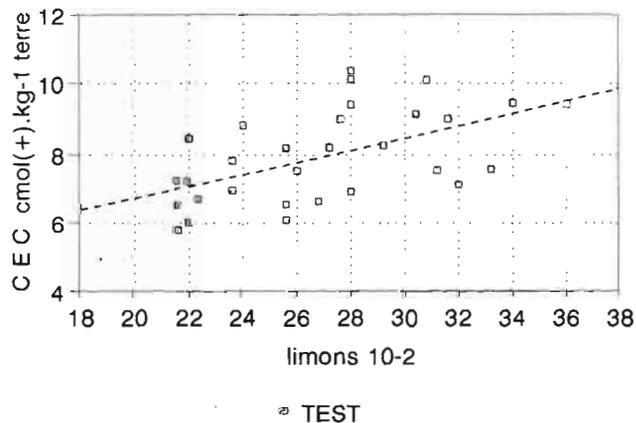


FIG. 13. — Relation entre la capacité d'échange et le taux de limon. Relation between the exchange capacity and loam.

TABLEAU V

Analyse des relations liant la capacité d'échange cationique (CEC) aux argiles (ARG), à la matière organique (MO) sur toutes les parcelles et pour toutes les profondeurs
 Analysis of the relations between the cation exchange capacity (CEC), clays (ARG) and organic matter (MO) in all plots and at all depths

Relation	Horizon (cm)	TEST 1+2	ESTI 1+2	MVFE1 1+2	MVFS 1+2
CEC-AR	0-10	++	-	++	+
	15-25	++	++	++	++
	30-40	++	++	++	++
AR-MO	0-10	-	+	+	0
	15-25	-	-	0	-
	30-40	--	-	-	+

Coefficient $r^2 > 0,300$: relation significative ++ ou --
 $0,100 < r^2 < 0,299$: tendance + ou -
 $r^2 < 0,099$: relation nulle 0

Sans autres possibilités d'analyser les limons, nous supposons qu'une partie de ces limons « actifs », provenant de cendres et ponces volcaniques, possède une surface spécifique importante, qui leur permettrait soit de participer directement à l'édification d'un complexe d'échange, soit de le faire en accueillant des composés électriquement chargés.

L'absence de relation nette, voire une tendance négative sur les parcelles ESTI, 0-10 cm contenant les plus forts taux de matière organique (1,6 à 2,7 %), oppose un premier démenti à l'hypothèse de l'additivité des CEC des composés minéraux et organiques. Ce qui suggère la possibilité, pour ce type de matériau et pour ce type d'amendement, d'une action inhibitrice possible des composés humiques synthétisés à partir de fumiers, sur les sites d'échanges électro-négatifs des argiles, voire des limons « actifs ».

Relation entre CEC et taux de matière organique

Les variations de la capacité d'échange cationique en fonction du taux de matière organique (fig. 14 et 15 ; tabl. V, ligne CEC-matière organique) ne suivent pas les évolutions communément observées sur des sols évolués. On distingue en effet deux comportements selon le taux de matière organique :

— pour des taux inférieurs à 1,2 %, une nette diminution des CEC ;

— pour des taux supérieurs à 1,2 %, soit une indépendance de la CEC (parcelle MVFS), soit une augmentation plus ou moins sensible de celle-ci (ESTI et MVFE) avec l'accroissement du taux de matière organique.

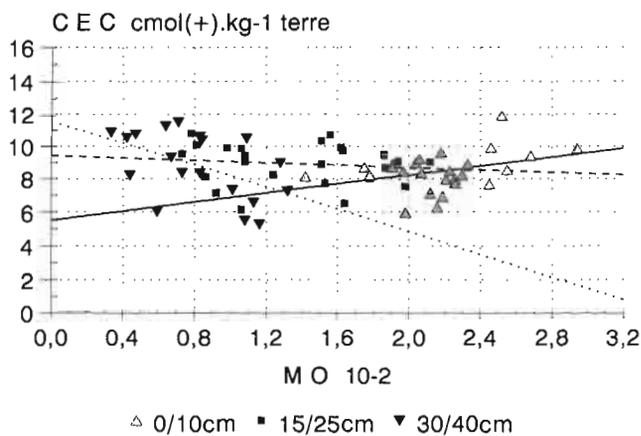


FIG. 14. — Relation entre la capacité d'échange et la matière organique, en surface, exemple de la parcelle ESTI.
Relation between the exchange capacity and the organic matter, example of ESTI plot, at a shallow depth.

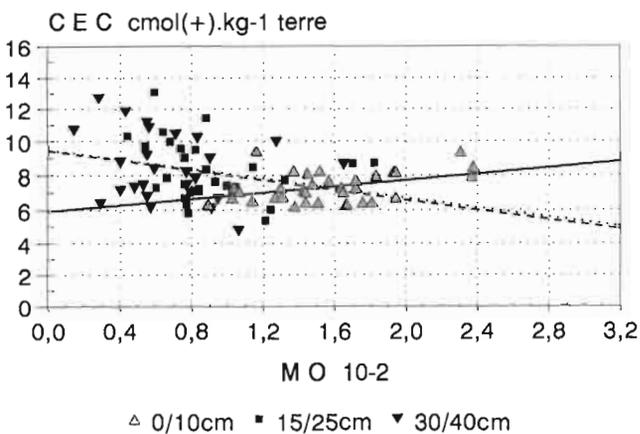


FIG. 15. — Relation entre la capacité d'échange et le taux de matière organique, en surface, exemple de la parcelle MVFE.
Relation between the exchange capacity and organic matter, example of MVFE plot at a shallow depth.

NOUVELLES HYPOTHÈSES

En résumé, la combinaison des deux niveaux d'analyse livre les enseignements suivants :

- en trois ans et demi, l'accumulation de matière organique est importante jusqu'à environ - 20 cm dans les parcelles amendées ;

- cette accumulation ne se traduit cependant par une augmentation de la capacité d'échange qu'en surface des parcelles ESTI et MVFE, à condition que celles-ci contiennent plus de 1,2 % de matière organique ;

- on note, par contre, un effet négatif de cette matière organique sur la capacité d'échange dans les horizons dont les taux de matière organique sont inférieurs à 1,2 % ;

- comme, d'une part, les relations CEC-argile, voire CEC-limon, sont hautement significatives et positives, que, d'autre part, les horizons à faible taux de matière organique sont les horizons profonds, et qu'enfin les taux d'argile augmentent avec la profondeur, il apparaît que les composés humiques synthétisés dans les horizons superficiels ont un rôle faiblement constructeur de complexe d'échange mais que les composés profonds ont un rôle fortement inhibiteur.

Ce comportement des composés humiques rappelle certaines des conclusions de travaux déjà anciens, ou plus récents, réalisés par BOISSEZON (1970) et BOISSEZON *et al.* (1991) sur la capacité d'échange d'autres types de sols. On retrouve en effet :

- une non-additivité probable des capacités d'échange des composés des deux origines, minérale et organique, pour pouvoir évaluer celle d'un complexe organominéral ;

- un blocage possible des sites d'échange des argiles soit par des précurseurs d'acides humiques, soit par des hydroxydes d'aluminium (altération actuelle des cendres ou héritage des gels allophaniques de sols enterrés ?) ;

- une inhibition des sites d'échange de la phase minérale qui paraît plus importante en profondeur des parcelles ayant reçu des matières d'origine animale ; elle est moins importante sur les parcelles où sont enfouis des fragments de végétaux frais (MVFE).

De nouvelles voies de recherche s'ouvrent donc pour confirmer ou infirmer ces hypothèses. Pour cela, de nouvelles actions sont déjà, ou seront, entreprises en fonction des possibilités du laboratoire d'analyses de sols et végétaux du Catie :

- fractionnement classique des composés organiques et analyse de la distribution des différentes fractions en fonction de leur site dans le sol et des origines animale ou végétale de la matière organique ;

- isoler le rôle des composés organiques dans la construction du complexe d'échange (par calcination de la matière organique) ;

- estimer la distribution des stocks organiques en analysant la terre totale, en prenant donc en compte les graviers de ponce (FELLER *et al.*, 1989), en comparant les teneurs pour chaque fraction granulométrique.

Effets sur le long terme

Les effets sur le long terme ne sont pas encore tous perceptibles, sauf ceux se traduisant par une réorganisation structurale d'horizons initialement minéraux et pulvérulents. Cette réorganisation, en cours sur toutes les parcelles, est plus active sur les parcelles recevant des matières végétales fraîches (MVFE et MVFS). Elle conduit au développement d'une macroporosité dans un matériau qui n'était jusqu'alors que microporeux et à l'augmentation de la cohésion interéléments, puis interagrégats, ce qui

permet d'éviter une érosion superficielle par « flottage » d'éléments dont la masse spécifique est inférieure à l'unité (sables et graviers de ponce).

On observe déjà, surtout dans les situations MVFE et MVFS, une structuration peu à moyennement développée en agrégats subanguleux à ronds qui traduit une reprise d'activité biologique, notamment celle des lombricidés depuis mi-1994.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Argumentation scientifique

L'incorporation d'amendements organiques dans des matériaux d'origine volcanique, tels que cendres et ponces, augmente significativement les rendements des cultures vivrières de base, comme le maïs et le haricot.

Ces incorporations permettent de *reconstruire un sol* en restaurant lentement un complexe absorbant et en réédifiant une structure, mais la vitesse et l'efficacité de ces reconstructions dépendent du type d'amendement organique utilisé. Depuis le début des essais, les deux types d'amendement ont eu des effets différents, essentiellement en relation avec les taux de matière organique du sol que ceux-ci ont, plus ou moins rapidement, permis d'atteindre :

— en partant de taux initiaux de quelque 0,7 % de matière organique, les matières d'origine animale (ESTI) permettent d'obtenir plus rapidement un enrichissement organique des horizons supérieurs des sols, ce qui se traduit par des effets plus rapidement intéressants sur les rendements ; un enrichissement équivalent n'est obtenu qu'au bout d'un an et demi par l'enfouissement de produits d'origine végétale (MVFE avec *Gliricidia sepium*) ;

— la construction du complexe d'échange ne semble commencer qu'à partir d'une accumulation d'environ 1,2 % de matière organique ; en deçà de ce taux, les composés synthétisés à partir des deux origines de matière organique (ESTI et MVFS) inhibent cette construction ;

— les informations sur le rôle des résidus épandus en surface (MVFS) sont moins nombreuses mais l'intérêt de ce traitement semble devenir proche, au bout de trois ans et demi, de celui de MVFE.

Finalement, la situation MVFE est presque aussi intéressante que la situation ESTI pour une réhabilitation par amendements organiques des sols dégradés différenciés sur cendres et ponces volcaniques du bassin versant de Las Cañas.

Argumentation socio-économique

Si l'on met en avant, cette fois, des préoccupations socio-économiques, on doit préconiser les traitements MVFE ou MVFS d'enfouissement ou d'épandage de fragments végétaux de *Gliricidia sepium* (seule légumineuse

essayée), pour des raisons ou des intérêts qui se manifestent à deux échelles.

À l'échelle du champ, ce sont des raisons stratégiques qu'il faut invoquer :

— il ne se produit pas suffisamment de fumier de poule chez les paysans pour un amendement autonome des champs, le fumier doit être acheté dans les élevages semi-intensifs ;

— comme les parcelles sont éloignées des lieux de production, le transport du fumier est une opération coûteuse (main-d'œuvre) et pénible, la traction animale ne pouvant être utilisée sur des versants trop pentus ;

— la fourniture des produits d'origine animale reste incertaine car soumise aux aléas économiques ; la pérennité de notre chaîne d'approvisionnement en fumier dépend en effet de celle de la production des poulets de la région de Tonacatépequé vers les restaurants populaires de San Salvador !

Compte tenu des arguments scientifiques développés précédemment, le choix d'amendements d'origine végétale est donc une voie judicieuse. Comment mener cette production de façon réaliste ?

Une agroforesterie incorporant des rideaux arbustifs ou arborés dans le champ lui-même ne convient pas car les parcelles sont trop petites pour perdre davantage de superficie et les rideaux de légumineuses arbustives n'ont pas prouvé, en Amérique centrale de cordillère volcanique, leur utilité dans le cadre de l'amélioration de la fertilité du sol (LEBEUF *et al.*, 1994). On observe toujours une baisse de rendement sensible des vivriers qui y sont associés, celle-ci ne pouvant être palliée que par un apport important d'engrais minéraux, ce qui n'est pas envisageable ici.

La fabrication de compost, prévue jadis, se heurte à deux problèmes : six mois de sécheresse surviennent au moment où l'on dispose de résidus végétaux (cannes, folioles de maïs, fanes et autres résidus des aires de battage), ce qui rend difficile le démarrage de toute fermentation ; 75 % de ces résidus sont consommés par le bétail, plus ou moins parqué dans les champs en saison sèche.

Il est, en revanche, possible de reconstruire ou d'épaissir tant soit peu les clôtures arbustives ou arborées souvent plantées dans ce pays pour leur adjoindre le rôle de bandes productrices de matière végétale fraîche. *Gliricidia sepium* et *Erithrina fusca* peuvent en effet produire de 8 à 10 t/ha/an de matière fraîche à partir de cinq ans. La clôture arborée élargie d'une parcelle de 1,5 ha pourrait déjà fournir, à proximité immédiate, environ 50 % de l'amendement organique frais nécessaire. Le complément peut être obtenu en plantant les portions trop déclives et les bords de ravins non cultivables, toujours proches des champs cultivés dans ces zones défavorisées.

À l'échelle du terroir, donc du bassin versant, nous n'avons certes pas changé radicalement les habitudes des

paysans de Tonacatépequé ; l'un d'entre nous a en revanche obtenu des réorientations : les semis de *Gliricidia sepium* font tache d'huile depuis la fin de 1994. À un profit individuel voulu et compris (augmentation immédiate des rendements) s'ajoute un profit pour la communauté vivant sur ce bassin, à savoir une réelle conservation intégrée du bassin versant.

L'aspect négatif de la pression démographique et de la « surprenante » distribution des terres aboutissant à ces parcelles exiguës est, pour une fois, contrebalancé par la transformation des versants de toute cette zone vulnérable en une mosaïque de barrières arbustives et arborées semi-naturelles. Celles-ci ne seront plus uniquement utiles comme source de matière végétale fraîche mais elles interviendront aussi dans la protection générale du bassin versant contre deux types de dégradations :

— celles occasionnées par les flux hydriques superficiels (érosion en nappe, érosion linéaire) ;

— celles de glissements possibles de terrain (COLLINET et SANCHEZ ESCOTO, 1993).

Ce second effet résulte, d'une part, de l'évapotranspiration des arbres extrayant des surcharges hydriques occasionnelles sur des pentes et matériaux très poreux où les tensions latérales peuvent dépasser la cohésion interne ; d'autre part, de l'ancrage de ces matériaux par le système racinaire profond.

Finalement, on est amené à évoquer le problème plus général de la conservation des sols très poreux et peu cohérents d'origine volcanique où le dilemme est le sui-

vant : faut-il favoriser l'infiltration ou faut-il favoriser le ruissellement ?

La réponse ne doit être donnée qu'en l'argumentant sérieusement par la connaissance de l'articulation des causes et des effets probables jouant dans le milieu considéré. Il n'était, par exemple, pas opportun de creuser l'important réseau de fossés de drainage sur des versants cendrés et très pentus car les infiltrations qu'ils provoquent, au cœur de la saison des pluies, ne peuvent pas être reprises par une couverture végétale encore trop insuffisante. Les risques de surcharges hydriques profondes, critiques, deviennent alors excessifs. Dans ce contexte bien spécifique, et seulement dans ce contexte, les fossés de drainage auraient dû suivre et non précéder la réhabilitation biologique du versant.

D'autres exemples recevraient certainement d'autres réponses, cela pour répéter que, malheureusement pour l'auréole des « savants », les problèmes de la gestion durable des sols et des eaux ou de la réhabilitation des sols ne connaîtront jamais une solution universelle mais toujours des réponses sectorielles, adaptées aux intensités des causes, aux échelles de risque acceptables. Il faut se faire à l'idée que la meilleure connaissance possible des processus pédologiques et hydrologiques ou des comportements agronomiques, que la meilleure modélisation possible ne permettront jamais de s'abstenir d'une consultation du terrain et de l'utilisation qu'en font ses occupants pour avoir le droit de préconiser tel ou tel type de gestion, telle ou telle réhabilitation.

BIBLIOGRAPHIE

- BOISSEZON (P. DE), 1970 — Étude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 8 (4) : 391-418.
- BOISSEZON (P. DE), BELLIER (G.), BRION (J.-C.), GAVINELLI (E.), FARDOUX (J.), 1991 — Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de pailles de luzerne dans le sol. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (3) : 263-280.
- CASTILLO AGUILAR (V. M.), 1992 — *Estimación de la erosión del suelo al nivel de cuenca utilizando análisis espacial y percepción remota en El Salvador*. Tesis Maestría, Catie, Turrialba, 69 p.
- COLLINET (J.), MAZARIEGO (M.), 1993 — *Restauración de suelos degradados volcánicos utilizando abonos orgánicos. Microcuenca del río « Las Cañas » (El Salvador). Primeros resultados*. Turrialba, Catie, 29 p.
- COLLINET (J.), MEDRANO (R.), 1991 — *Diagnósticos, potencialidades y factores limitantes de algunos de los sistemas de suelos representativos de una sub-cuenca del río Las Cañas (El Salvador)*. Turrialba, Catie, 49 p.
- COLLINET (J.), SANCHEZ ESCOTO (O. A.), 1993 — *Determinación del riesgo de derrumbe en la cuenca del río Reventado (Cartago, Costa Rica, América Central)*. Turrialba, Catie, 16 p.
- FELLER (C.), BALESSENT (J.), CHEVIGNARD (T.), LACOEUILHE (J.-J.), 1989 — Préparation d'échantillons riches en ponces volcaniques en vue de l'étude de leur stock organique. Application à des sols cultivés en ananas (Martinique). *Fruits*, 44 (7-8) : 385-391.
- FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.), VALENTIN (C.), 1991 — Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest en particulier). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (1) : 25-36.
- HARTSHORN (G. S.) *et al.*, 1982 — *Country environmental profile, a field study (Costa Rica)*. Tropical Science Center, Usaid mission of Costa Rica, 123 p.
- HOLDRIDGE (L. R.), 1967 — *Life zone ecology*. San José, Tropical Science Center, 206 p.
- HOLDRIDGE (L. R.) *et al.*, 1971 — *Forest environments in tropical life zone. A pilot study*. London, Pergamon Press, 747 p.

- LEBEUF (T.), COLLINET (J.), KASS (D.), FAUSTINO (J.), 1994 — *Modelación de la conservación de suelos en cultivos en cajellones y normas de distanciamiento para suelos volcánicos*. Turrialba, Catie, 13 p.
- PRAT (C.), 1991 — *Étude du Talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique, son rôle dans l'érosion des sols*. Thèse doct., univ. Paris-VI, 350 p.
- QUANTIN (P.), ZEBROWSKI (C.), DELAUNE (M.), HIDALGO (C.), 1992 — El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México) : loess o cinéritas. *Terra*, 10 (num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos » : 178-182.

Amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés du Nord-Cameroun en vue de leur réhabilitation

Dominique MASSE (1), Christian FLORET (2), Roger PONTANIER (3) et Lamine SEINY BOUKAR (4)

(1) Orstom/MAA, bureau RZA Cefe/CNRS, route de Mende, 34033 Montpellier cedex, France.

(2) Cefe-CNRS, route de Mende, 34033 Montpellier cedex, France.

(3) Orstom/MAA, 7, rue Teimour, BP 434, 1004 Tunis-El Menzah, Tunisie.

(4) Ira, BP 33, Maroua, Cameroun.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'étudier les moyens d'amélioration du régime hydrique de vertisols dégradés et érodés dans les régions semi-arides du Cameroun. Les pratiques testées concernent des petits aménagements hydroagriques de type « pitting », bandes alternées, « microcatchment » et casiers, associés à certaines façons culturales comme le labour ou le buttage. Sur les sols fortement dégradés, le suivi de l'évolution des réserves hydriques du sol a montré que l'amélioration du régime hydrique était limitée après deux années de mise en place, l'absence de macroporosité fissurale restreignant considérablement la circulation de l'eau dans ces sols riches en argiles de type smectite. Sur des vertisols moyennement dégradés, la conservation de la macroporosité fissurale est liée à des aménagements tels que les casiers, qui maintiennent une charge hydraulique élevée dans cette porosité et assurent une importante humectation en profondeur. Une meilleure compréhension du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés a permis de présenter une modélisation des termes du bilan hydrique.

MOTS CLÉS : Nord-Cameroun — Vertisols — Dégradation — Réhabilitation — Bilan hydrique — Modélisation — Aménagement des sols.

ABSTRACT

SOIL WATER BALANCE IMPROVEMENT OF THE DEGRADED VERTISOLS IN NORTHERN-CAMEROON FOR THEIR REHABILITATION

This study concerns the means to improve the soil water balance of degraded and eroded vertisols in the semi-arid zone of Cameroon. The tested practices are small soil surface workings such as pitting, alternated strips, microcatchment or gridworks of small ditches, associated with some tillages like ploughing or earthing-up. On strongly degraded soils, the evolution of the total quantity of soil water reserves showed that, after two years of observations, the water regime improvement was limited; in fact, in these soils which are rich in smectite clay, the lack of cracking porosity, after degradation, restricted considerably the water flow. On fairly degraded vertisols, the cracks conservation are obtained with managements like gridworks of small ditches, which can maintain a high hydraulic charge on macroporosity, and ensure an important moistening in depth of soil. A better understanding of degraded vertisols water regime allowed to propose a soil water balance model.

KEYWORDS : Northern-Cameroon — Vertisol — Degradation — Rehabilitation — Water balance — Modelization — Soil management.

RESUMEN

MEJORA DEL RÉGIMEN HÍDRICO DE LOS VERTISUELOS DEGRADADOS EN EL NORTE DE CAMERÚN CON OBJETO DE SU REHABILITACIÓN

El objetivo de ese trabajo consiste en estudiar los medios para mejorar el régimen hídrico de los vertisuelos degradados y erosionados en las regiones semiáridas de Camerún. Las prácticas probadas conciernen a unas pequeñas

instalaciones hidroagrícolas de tipo pitting, bandas alternadas, microcatchment o casilleros que se asocian con ciertos trabajos del campo como la labor o el aporcado. Sobre los suelos fuertemente degradados, la evolución de las reservas hídricas del suelo ha mostrado que la mejora del régimen hídrico era limitada después de dos años de instalación; la falta de macroporosidad por fractura limitando considerablemente las circulaciones del agua en esos suelos ricos en arcilla de tipo esmectita. Sobre unos vertisuelos medianamente degradados, la conservación de la macroporosidad por fractura está ligada con instalaciones tales como los casilleros que mantienen una carga hidráulica elevada en esa porosidad y permiten una humectación importante a fondo. Comprender mejor el funcionamiento hídrico de los vertisuelos degradados ha permitido presentar una modelización de los términos del balance hídrico.

PALABRAS CLAVES : Vertisuelos — Norte de Camerún — Degradación — Rehabilitación — Balance hídrico — Modelización — Habilitación de los suelos.

INTRODUCTION

La province de l'Extrême-Nord du Cameroun est située approximativement entre le 10^e et le 13^e parallèle nord. Cette région est soumise à un climat de type soudano-sahélien à sahélien (OLIVRY, 1986).

Les premiers inventaires des sols du Nord-Cameroun datent des années 1950 ; une synthèse pédologique concernant les sols et les ressources en terres a été réalisée par BRABANT et GAVAUD (1985). Plus récemment, des études faites dans la région de Maroua ont permis de caractériser les principaux systèmes écologiques représentatifs de la région, leur fonctionnement et la dynamique d'évolution du milieu (PONTANIER *et al.*, 1984 ; THEBE, 1987 ; CEE, 1988 ; PONTANIER et THEBE, 1989 ; SEINY BOUKAR, 1990 ; SEGHERI, 1990). Tous ces auteurs ont montré l'incidence majeure de la dégradation des sols dans cette région. Celle-ci se caractérise par la diminution de la réserve utile du sol et de la profondeur maximale humectée, ainsi que par la baisse de l'efficacité des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol. Le régime hydrique des sols subit alors un dysfonctionnement qui aboutit à l'augmentation du stress hydrique pour les végétaux. La dégradation des sols contribue donc à terme au déséquilibre des écosystèmes et à la baisse de fertilité du milieu (GAVAUD, 1971 ; SEINY BOUKAR, 1990).

Les causes les plus souvent avancées sont d'ordre climatique ; la baisse de la pluviosité annuelle a eu une incidence sur la croissance de la végétation qui a vu son rôle protecteur contre l'agressivité des pluies diminuer, ce qui a provoqué d'importants processus d'érosion (BRABANT et GAVAUD, 1985 ; ROOSE, 1990 a ; BOLI *et al.*, 1991). Par ailleurs, les modalités de gestion du milieu par l'homme ont amplifié la sécheresse climatique. On note en effet, au cours des dernières décennies, une surexploitation des ressources agropastorales, marquée notamment par la diminution des temps de jachère des terres cultivées. Une sécheresse de type édaphique, au sens défini par FLORET et PONTANIER (1984), intervient alors dans les phénomènes de dégradation et d'érosion.

Actuellement, dans cette région, on est en présence de vastes surfaces cultivées sporadiquement, voire abandonnées, en raison des faibles rendements et de l'irrégularité de la production, d'où leur appellation de terres marginales (CEE, 1988). Cette dégradation ne semble pas réversible par les seuls processus de la régénération naturelle. Les systèmes ont franchi des seuils d'irréversibilité (FLORET et PONTANIER, 1982 ; ARONSON *et al.*, 1993) et une intervention humaine forte est nécessaire pour redonner à ces sols une productivité durable.

Dans le cadre d'une forte croissance démographique et de besoins en terres cultivables, des études sur les moyens de réhabilitation ou de restauration des terres dégradées et érodées se justifient. De telles études sur la dynamique progressive ont aussi un intérêt sur le plan de la recherche fondamentale en écologie, puisqu'elles permettent notamment de tester les théories écologiques concernant l'évolution des écosystèmes. La « réhabilitation », selon BRADSHAW (1987), vise à rétablir une partie des propriétés biologiques et physiques de l'écosystème d'origine pour maximiser la production, contrairement à la « restauration », dont la finalité est de reconstituer totalement les propriétés écologiques originelles, souvent à des fins de conservation du milieu. Une écologie de la réhabilitation se fait jour actuellement, qui privilégie le retour à un meilleur fonctionnement d'un site perturbé ou dégradé sans viser l'écosystème originel comme objectif ultime (ALLEN, 1988).

Des techniques variées de réhabilitation de sols dégradés et érodés sont utilisées en zone sahélienne ou soudano-sahélienne (ROOSE 1990 b, 1992 ; SERPANTIÉ *et al.*, 1992). Elles concernent le plus souvent des petits ouvrages anti-érosifs, des plantations, ou des mises en défens temporaires, généralement sur des sols à texture relativement grossière.

Au Nord-Cameroun, un diagnostic sur la dynamique des écosystèmes et de leurs réponses aux perturbations anthropiques a été le point de départ d'études concernant la réhabilitation des terres marginales sur des sols argileux de type vertisol (CEE, 1988). Cet article se propose d'ana-

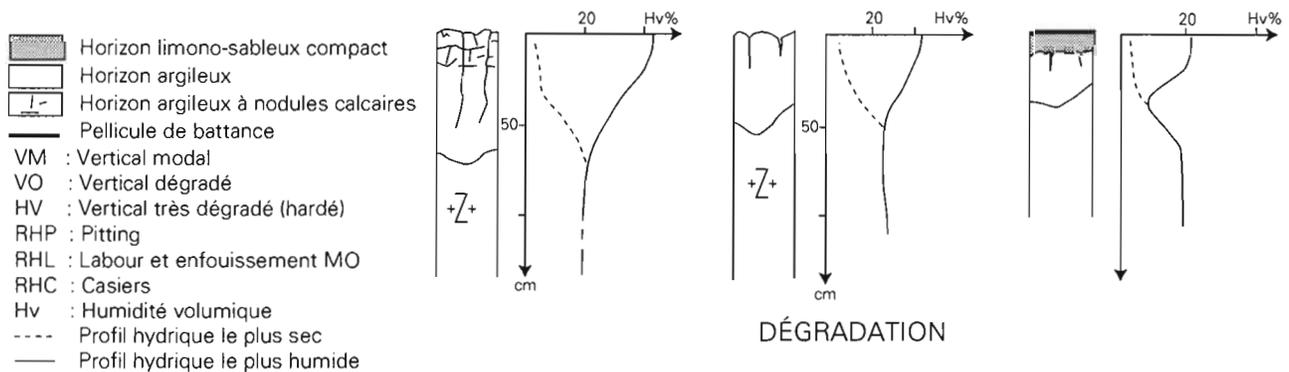
lyser plus particulièrement les résultats obtenus concernant les moyens susceptibles d'améliorer le régime hydrique en vue d'une réhabilitation des vertisols dégradés, largement représentés au Nord-Cameroun. Deux niveaux de dégradation des vertisols, sols « hardés » (très dégradés) et vertisols dégradés (moyennement dégradés), ont fait l'objet de petits aménagements de surface. L'évolution de l'humidité du sol a été suivie pour en tester l'efficacité. L'étude a été complétée par une modélisation du bilan hydrique.

MATÉRIEL ÉTUDIÉ

Les vertisols s'étendent au Nord-Cameroun sur près de 1,2 million d'hectares (DUDAL, 1965). Ils sont, dans cette région, une composante commune à de nombreux éco-

systèmes. Leur usage est en général de type pastoral, mais leurs propriétés physico-chimiques et plus particulièrement leur capacité de rétention en eau en font des sols propices à une mise en culture spécifique : le sorgho de contre-saison (*Sorghum durum*) (ECKEBIL *et al.*, 1972).

Dans leur synthèse pédologique, BRABANT et GAVAUD (1985) ont noté sur ce type de sols des phénomènes d'érosion et de dégradation très alarmants ; 48 % des vertisols lithomorphes sont répertoriés par ces auteurs sous une forme dégradée ou érodée. La dégradation des vertisols est marquée plus particulièrement par l'évolution de la structure prismatique des horizons supérieurs vers une structure polyédrique fine puis massive (SEINY BOUKAR, 1990). Simultanément, les taux de matière organique diminuent ainsi que les proportions d'éléments fins dans l'horizon superficiel (fig. 1). Il en résulte une modification



SYSTÈMES ÉCOLOGIQUES		En bon état - modal	Dégradé tronqué	Hardéisé irréversible
CARACTÉRISTIQUES HORIZON DE SURFACE (0-20 cm)	RU (mm)	40-45	30-35	20-25
	CEC (mg/100g)	35	25	17
	Mat. org. (%)	1,65	1,05	0,8
	A + L (%) (0-20 μ)	60-65	40-45	30-35
Coefficient d'efficacité moyen de la pluie (Ke %)		75-85	50-60	30-40
Augmentation maximale du stock d'eau sur 80 cm (mm)		80-120	60-80	25-35
Profondeur maximale humectée en année moyenne (cm)		60-70	50-60	30-40
Nombre d'espèces herbacées		15-18	8-13	7-9

FIG. 1. — Caractérisation physico-hydrice des différents stades de dégradation des vertisols décrits au Nord-Cameroun par SEINY BOUKAR (1990).
 Physico-hydric characterisation of the different stages of vertisol degradation described in Northern-Cameroun by SEINY BOUKAR (1990).

des capacités d'échange cationique et de la réserve utile, qui diminue de moitié environ dans les vingt premiers centimètres. La susceptibilité à l'encroûtement de surface et la diminution des mouvements de retrait et de gonflement impliquent une diminution du coefficient d'efficacité moyen des pluies ; celles-ci deviennent alors fortement érosives. La végétation est marquée par une diminution de la richesse floristique liée à l'augmentation de l'aridité édaphique (SEGHERI, 1990 ; DONFACK, 1992). Au Malawi, MITCHELL (1987) a décrit des phénomènes similaires sur des vertisols cultivés intensivement en coton.

Pour notre étude, nous avons considéré deux stades de dégradation dans la séquence vertisolique décrite par SEINY BOUKAR (1990) sur le bassin versant de Mouda.

Dans le premier type de sol étudié, désigné comme « vertisol dégradé », l'expression des caractères vertisoliques de surface devient faible. On observe notamment la présence d'un microrelief plat, l'existence de phénomènes de battance et la diminution de la macroporosité fissurale, qui reste cependant encore fonctionnelle. Ces sols font l'objet à l'heure actuelle d'une mise en culture sporadique. L'amélioration du régime hydrique entreprise dans cette étude vise à favoriser la régularisation de la mise en culture de ces sols, en assurant l'adéquation des disponibilités en eau avec les besoins de la plante cultivée au cours du cycle.

Le second stade de dégradation est désigné par le terme « hardé » emprunté à la langue fulfuldé, qui définit communément toute terre peu propice à une mise en culture (VAILLE, 1970). Le sol est caractérisé par un horizon superficiel sablo-argileux massif et compact, recouvert d'une épaisse pellicule de battance. Cet horizon, épais de 5 à 20 cm, recouvre un horizon sous-jacent argileux et vertique, présentant des nodules calcaires. Sur ces terres, aux propriétés physico-hydriques particulièrement défavorables, une tentative de « réactivation biologique » a été lancée, qui ne vise pas dans un premier temps à une remise en culture. Des pratiques permettant l'augmentation des réserves en eau du sol, concomitante à une augmentation des teneurs en matière organique, devraient redonner à ces sols un statut qui leur assurerait une production pastorale durable.

L'amélioration de l'efficacité des pluies constitue donc le point essentiel pour une réhabilitation de tels sols (MITCHELL, 1987 ; FLORET *et al.*, 1991). Pour atteindre cet objectif, nous avons privilégié ici des méthodes basées sur la réalisation de petits aménagements de contrôle du ruissellement de surface applicables par les paysans (CEE, 1988 ; MASSE, 1992).

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET INDICATEURS SUIVIS

Nous avons retenu quatre types d'aménagement associés à des façons culturales dont le rôle principal est de

capter le ruissellement, et de favoriser l'augmentation des quantités d'eau infiltrées et stockées dans le sol :

— l'aménagement « pitting » est constitué de trous de 1 m x 0,30 m x 0,15 m ; ceux-ci sont disposés en quinconce sur la parcelle ;

— l'aménagement en « bandes alternées » est basé sur l'alternance de bandes labourées et de bandes non labourées de 5 m de largeur se situant en amont et jouant le rôle d'impluvium ;

— l'aménagement « microcatchment » obéit au même principe que l'aménagement « bandes alternées » mais se différencie par la présence d'une diguette sur le front aval de la bande réceptrice du ruissellement provenant de l'impluvium ;

— l'aménagement en « casiers » consiste en un carroyage de la surface du sol par des diguettes de 20 à 30 cm de hauteur ; les dimensions de chaque casier sont de 5 m x 5 m.

La figure 2 donne une description schématique de ces aménagements.

Les aménagements testés sur les sols hardés sont le pitting, les bandes alternées et le microcatchment ; tous sont comparés à une parcelle témoin sans aménagement particulier. En dehors de l'aspect de l'augmentation de l'infiltration des eaux météorites dans le sol, l'objectif sur les sols hardés est également d'améliorer leur statut organique. Des labours successifs sont donc réalisés, qui permettent l'enfouissement de la végétation spontanée. Seuls les traitements « bandes alternées » et « microcatchment » sont concernés par ces façons culturales superficielles (IRA-CNS, 1989).

En ce qui concerne la régularisation de la mise en culture de contre-saison des vertisols dégradés, l'objectif est d'obtenir le maximum de réserve hydrique en fin de saison des pluies, période qui correspond à la phase d'installation de la culture. Deux aménagements, les casiers et le microcatchment, sont comparés à l'itinéraire traditionnel pour lequel aucun ouvrage de collecte et de conservation des eaux n'est réalisé.

Le dispositif expérimental est constitué de deux répétitions par type d'aménagement et de sol. Les aménagements ont été testés sur des parcelles élémentaires de 30 m x 15 m. Les indicateurs suivis sont l'évolution des réserves hydriques du sol à partir de mesures par humidimétrie neutronique. Le pas de temps d'acquisition des données est de six à huit jours. Sur les vertisols dégradés, le suivi d'une culture de sorgho repiqué de variété « muskwaari » a également fourni des indications sur l'efficacité des différents aménagements testés (MASSE, 1992).

La pluviosité a été suivie, quotidiennement, grâce à trois pluviomètres, placés à 1,5 m de hauteur ; un sur le site des sols hardés, et deux sur celui des vertisols dégradés.

RÉSULTATS

Effets des traitements sur la réserve en eau totale pour le faciès le plus dégradé, les sols hardés

La figure 3 présente les courbes comparatives d'évolution des réserves hydriques pour les différents traitements, entre d'une part 0 et 40 cm et d'autre part 40 et 100 cm de profondeur.

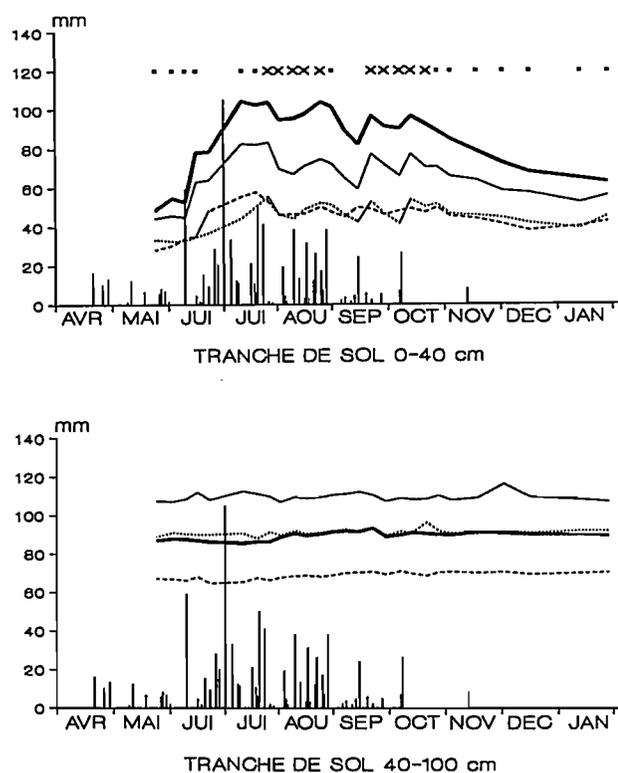


FIG. 3. — Évolution de la réserve en eau totale sur sol « hardé » en 1990, sur les tranches 0-40 cm, 40-100 cm et 0-100 cm, pour les traitements bandes alternées (—), microcatchment (—), pitting (...) et témoin (---).

Les petits carrés noirs indiquent une différence significative $p = 0,95$ entre tous les aménagements ; x : différence significative $p = 0,95$ entre bandes alternées et microcatchment. Les histogrammes représentent les hauteurs des précipitations journalières.

Soil water content evolution on « hardé » soil in 1990, from 0 to 40 cm depth, 40 to 100 cm depth, for the different treatments: alternated strips (—), microcatchment (—), pitting (...) and control (---).

Les variations d'humidité volumique concernent essentiellement les quarante premiers centimètres. Pendant toute la saison des pluies, la tranche de sol 40-100 cm ne présente pratiquement aucune variation de réserve hydrique totale pour les trois aménagements.

La réserve en eau totale, mesurée entre 0 et 40 cm de profondeur, est significativement différente entre les traitements « bandes alternées » et « microcatchment », d'une part, et les traitements « pitting » et « témoin », d'autre part. Toutefois, cette différence s'estompe dès que l'on a une période sèche notable au cours de la saison des pluies (cas du mois de septembre 1990).

Les aménagements microcatchment et bandes alternées modifient donc la réserve hydrique totale par rapport au témoin, avec respectivement un accroissement de 88 % et 48 % en valeur cumulée sur l'ensemble de la saison de mesure (tabl. I). Les maximums de réserve sont atteints vers la fin de la première décennie de juillet, avec un nouveau pic au cours de la troisième décennie d'août.

Sur l'aménagement pitting, aucune amélioration du bilan hydrique n'apparaît à 50 cm du trou, distance à laquelle ont été mesurées les teneurs en eau. Ce résultat est confirmé par des mesures d'humidité par prélèvement à la tarière, dans le trou, et à des distances intermédiaires du tube. La figure 4 présente les résultats d'une série de mesures effectuées en octobre 1990 après une pluie de 26 mm. Les échantillons ont été prélevés à des distances de 20 cm et de 40 cm, à partir de la bordure du trou. On constate que les teneurs en eau ne sont pas modifiées à ces distances. En revanche, l'observation de l'humectation jusqu'à 50 cm de profondeur à partir du fond du trou montre que la circulation verticale est plus aisée.

Enfin, du début du mois de juillet jusqu'à la fin du mois d'août, de nombreuses flaques d'eau pratiquement permanentes ont été observées sur les bandes labourées des aménagements microcatchment et bandes alternées ; les premières pluies assurent une recharge hydrique des quarante premiers centimètres, ensuite les quantités d'eau « récoltées » sont plus importantes que les quantités d'eau infiltrables et des excès d'eau apparaissent alors dans l'horizon superficiel. L'aménagement pitting présente le même phénomène ; les trous concentrent l'eau de ruissellement et se vident très lentement, voire pratiquement pas, tout au long de la saison des pluies.

TABLEAU I

Réserves hydriques totales et disponibles pour les différents aménagements testés sur sols « hardés ». Les mesures concernent la tranche de sol comprise entre 0 et 40 cm de profondeur et la période allant de mai 1990 à janvier 1991
Soil-water content and availability for different practices tested on « hardé » soils. The data concern the soil volume between 0 and 40 cm depth, during the period between May, 1990 and January, 1991

Aménagements	Réserves hydriques totales maximales (mm)	Cumul des réserves hydriques journalières (témoin = 100)	Durée de présence des réserves hydriques disponibles (mois)
Bandes alternées	83	148	1,6
Microcatchment	104	188	4,9
Pitting	56	101	0
Témoin	58	100	0

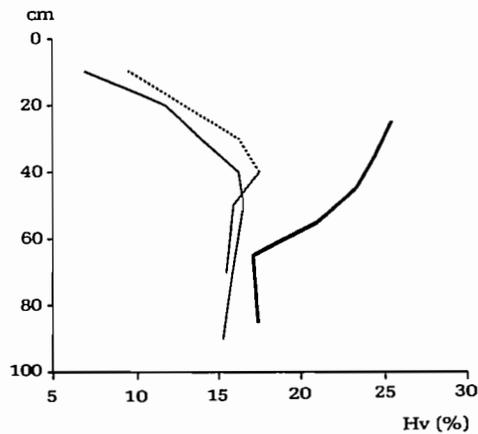


FIG. 4. — Influence du pitting sur le profil hydrique à 20 cm (---) et 40 cm (—) de la bordure du trou, et dans le trou (—), sur sol « hardé » en octobre 1990.

Influence of the pitting treatment on the hydric profile from the pit distance of 20 cm (---) and 40 cm (—), and in the pit (—) on « hardé » soil in October 1990.

Effets des traitements sur l'évolution de la réserve en eau totale pour les vertisols dégradés

La figure 5 présente l'étude comparée de l'influence des différents aménagements sur l'état de la réserve hydrique totale.

Sur les cinquante premiers centimètres, la réserve en eau totale augmente par paliers. Cela correspond à l'humectation consécutive aux deux épisodes pluvieux du mois de juin. À partir du mois de juillet, la réserve hydrique fluctue autour d'une valeur élevée : de l'ordre de 180 à 190 mm sur les casiers, et de 150 à 170 mm sur le microcatchment. Le témoin se maintient à un niveau plus bas, de l'ordre de 100 mm. Le réservoir inférieur, de 50 à 100 cm, présente des variations nettement moins importantes qui ne sont pas directement concomitantes avec les épisodes pluvieux.

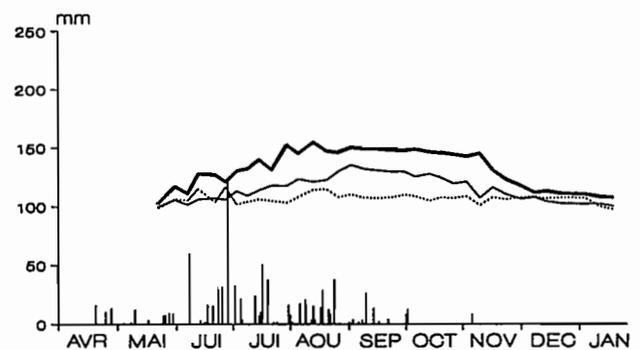
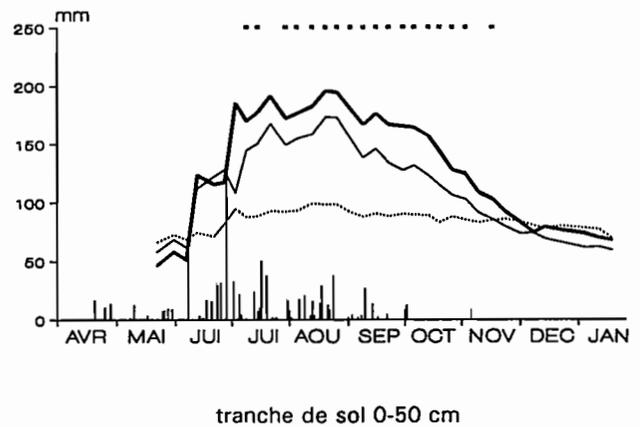


FIG. 5. — Évolution des réserves hydriques totales en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm, pour les aménagements en casiers (—), microcatchment (—) et témoin (---), sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison.

Les petits carrés noirs indiquent une différence significative entre les trois traitements à la date considérée. Les histogrammes représentent les hauteurs des précipitations journalières.

Soil water content evolution on degraded vertisols in 1990, between 0 and 50 cm depth, 50 and 100 cm depth, for the different treatments: gridworks of small ditches (—), microcatchment (—), and control (---)

Entre 0 et 50 cm de profondeur, les réserves hydriques sont significativement différentes entre les trois traitements sur une période allant de la première décade de juillet à la troisième décade du mois de novembre.

Sur l'ensemble du profil mesuré (0-100 cm), les résultats sont identiques. La réserve en eau totale ne varie pra-

tiquement pas sur le témoin (150 mm). Les maxima atteints sur les aménagements en casiers et microcatchment sont respectivement de 341 mm et 295 mm, et entre ces traitements, pour la même période que précédemment, les moyennes sont significativement différentes (tabl. II).

TABLEAU II

Réserves hydriques totales et disponibles pour les différents aménagements testés sur vertisols dégradés.

Les mesures concernent l'horizon 0-100 cm et la période allant de mai 1990 à janvier 1991

Soil-water content and availability for different practices tested on degraded vertisols. The data concern the soil volume between 0 and 100 cm depth, during the period between May, 1990 and January, 1991

Aménagement	Réserves hydriques totales maximales (mm)	Cumul des réserves hydriques journalières (témoin = 100)	Durée de présence des réserves hydriques disponibles (mois)
Casiers	341	137	4,7
Microcatchment	295	119	3,7
Témoin	213	100	0

Les casiers stockent donc davantage d'eau, essentiellement au niveau des cinquante premiers centimètres, et conservent des disponibilités pour le végétal sur une période plus longue. À partir de la mi-novembre, les différences de réserve n'apparaissent plus entre les différents aménagements. Pendant la saison sèche, les parcelles aménagées en casiers sont les seules à avoir présenté une augmentation du nombre de fentes de retrait apparaissant à la surface du sol.

Les observations sur le comportement agronomique du sorgho repiqué de contre-saison ont montré pour les deux

années des différences nettes entre, d'une part, les casiers et, d'autre part, le microcatchment et le témoin. Les résultats sur la vitesse de croissance et la production de biomasse aérienne consignés dans le tableau III le confirment. La croissance fut non seulement plus importante mais également beaucoup plus homogène sur l'ensemble des parcelles expérimentales aménagées en casiers. De même, la reprise des plants, après repiquage, fut nettement plus difficile avec le microcatchment et le témoin, où l'on a relevé des pertes à la reprise de l'ordre de 60 à 90 %, alors que celles-ci se situaient entre 40 et 45 % sur les casiers.

TABLEAU III

Comparaison de la quantité de matière sèche produite et de la vitesse de croissance du sorgho de contre-saison en fonction des différents aménagements sur vertisols dégradés (les blocs 1 et 2 correspondent au deux répétitions dans le dispositif expérimental)

Comparison of dry matter production and growth rate of post-rainy sorghum for different practices tested on degraded vertisols (« bloc 1 » and « bloc 2 » correspond with the two repetitions in the experimental plan)

Aménagement	Bloc	Matière sèche (t/ha)		Croissance (m/j)	
		1989	1990	1989	1990
Casiers	1	2,3	1,3	1,9	1,2
	2	1,5	1,3	1,3	1,9
Microcatchment	1	1,5	0,4	0,7	0,5
	2	1,1	0,7	0,6	0,6
Témoin	1	1,4	0,6	1,0	0,3
	2	1,2	0,4	1,8	0,4

Modélisation du bilan hydrique des vertisols dégradés

À partir de l'ensemble de ces observations, il a été possible de définir et d'établir un modèle de fonctionnement hydrique des vertisols dégradés. La modélisation est un excellent outil de structuration de l'ensemble des observations réalisées. Elle nous permet ainsi de dégager les points primordiaux du fonctionnement hydrique des sols dégradés qui nous concernent. Par ailleurs, la modélisation peut servir à une simulation d'une variation des conditions de pluviosité ou d'aménagement.

Le modèle de bilan hydrique de type déterministe, développé initialement par FRANQUIN et FOREST (1977), a l'avantage de fonctionner à partir de données agromatologiques simples. Le principe est basé sur la comptabilisation des gains et des pertes en eau d'un système eau-sol-plante (équation 1) :

$$\Delta S = P - R - D - ETR \quad (1)$$

— ΔS représente la variation de réserve hydrique totale pour un réservoir sol considéré ;

— P constitue l'apport en eau par les précipitations ;

— les pertes en eau sont constituées par R le ruissellement à la surface du sol, D le drainage au-delà des limites du réservoir considéré et ETR l'évapotranspiration réelle.

À partir des connaissances acquises sur le fonctionnement des vertisols, nous avons proposé un schéma hypothétique du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés définissant les différents termes du bilan hydrique.

Au début de la saison des pluies, quatre phases dans l'évolution des réserves hydriques sont considérées :

— une phase d'humectation du profil : les hauteurs de pluie, qui ont échappé au ruissellement, présentent, à travers la macroporosité fissurale, une pleine efficacité dans la recharge hydrique du profil ; le sol est nu, et l'évaporation directe à partir du sol est très faible voire nulle ;

— une phase de saturation hydrique : le gonflement des argiles provoque la fermeture de la macroporosité, l'infiltration de l'eau est alors très lente ; les pertes par évaporation, à partir de stagnations d'eau libre, sont très importantes, proches de la demande évaporative ;

— une phase de dessèchement : elle débute avec le ralentissement de la fréquence des pluies puis l'arrêt total des précipitations ; l'évapotranspiration réelle diminue fortement en fonction de la diminution des réserves hydriques disponibles dans le sol ;

— une phase de dessèchement total : la végétation est absente et les réserves en eau disponibles inexistantes, l'évapotranspiration réelle est donc très faible voire négligeable.

Dans ce schéma apparaissent deux seuils limitants. Le premier, Lhs, correspond à une limite entre la phase d'hu-

mectation et la phase de saturation hydrique, qui peut donc être atteinte lorsque la quantité d'eau présente dans le sol est nécessaire et suffisante pour provoquer la fermeture du réseau fissural. Le second, Lsd, correspondant au début de la phase de dessèchement, est fonction du ralentissement des pluies, la limite pouvant être caractérisée par une pluviosité minimale pendant la période de simulation considérée.

Sur la base de nos résultats expérimentaux, nous avons simplifié l'estimation des divers paramètres de ce schéma et évité ainsi des ajustements successifs trop nombreux qui nous auraient éloignés d'un modèle réellement explicatif (MASSE, 1992).

Par conséquent, nous considérons que (tabl. IV) :

— la limite Lhs est atteinte lorsque la réserve hydrique totale s'est accrue de 80 % par rapport à la réserve hydrique du début de saison des pluies ;

— la limite Lsd correspond à des précipitations inférieures à 20 mm au cours de deux décades successives ;

— l'ETR, négligeable pendant la phase d'humectation en raison de l'infiltration par les fissures, devient égale à l'ETP Penman pendant la phase de saturation hydrique ;

— pour la phase de dessèchement du profil, l'observation de l'évolution de la réserve hydrique totale est traduite par une loi exponentielle de décroissance.

La figure 6 représente, suivant un pas de temps décadaire, la courbe d'évolution des réserves hydriques calculées par le modèle dans les conditions d'une parcelle cultivée, en 1989, en sorgho de saison des pluies, sans aucun aménagement spécifique. La comparaison graphique entre les valeurs mesurées et estimées montre que le modèle et les hypothèses émises à sa construction sont satisfaisants (MASSE, 1992).

À partir de ce modèle, il est possible d'étudier l'influence de conditions pluviales différentes. La figure 7 reprend l'exemple précédent mais en simulant une sécheresse en cours de saison des pluies pendant les mois de juillet et août. La baisse des réserves hydriques totales est effective pendant la période de sécheresse ; en revanche, une baisse des pluies de 20 % en juillet et en août induit paradoxalement une augmentation des réserves hydriques pendant le mois de septembre, période qui correspond, en général, à la floraison. Les mêmes observations apparaissent avec une baisse de 80 % des pluies. Ces phénomènes s'expliqueraient par la « réouverture » du réseau fissural, provoquée par une baisse des teneurs en eau en cas de sécheresse. On a alors une capacité accrue de mise en réserve de l'eau dans le sol. Le modèle prend en compte ce phénomène par l'intermédiaire du seuil Lhs, qui délimite la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique.

TABLEAU IV
Description du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés, et évolution
des différents termes du bilan hydrique au cours du temps
*Description of the soil water regime of the degraded vertisols
and evolution of the soil water balance parameters*

Bilan hydrique	phase d'humectation	phase de saturation hydrique	phase de dessèchement	phase de dessèchement total
Réserve hydrique totale 0-100 cm	Lhs		Lsd	.
Evapotranspiration Réelle	ETR = Kh ETP Kh faible	ETR = Ks ETP Ks élevé	ETR = ETP [1 - e ^{-α(So - Si)}]	
Ruissellement	Lr = 0,541 P - 0,103 CV + 0,075		-	-
Drainage	négligeable			
Pluviosité	.			

Lhs : Seuil limite entre la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique Lsd : Seuil limite entre la phase de saturation hydrique et la phase de dessèchement So : Réserve hydrique totale en fin de saison sèche Si : Réserve hydrique totale au jour i Lr : Lane ruisselée en mm P : Hauteurs précipitées en mm CV : indice de couvert végétal

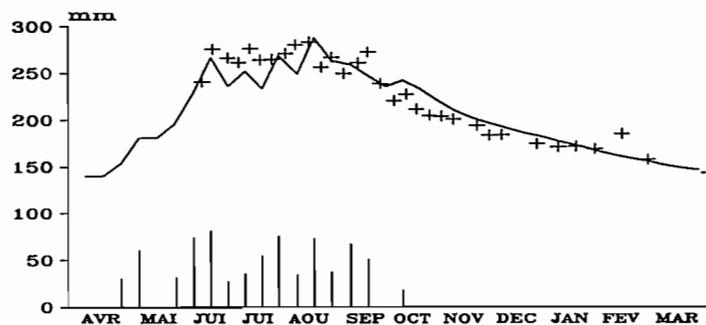


FIG. 6. — Estimation de l'évolution des réserves en eau du sol de l'horizon 0-100 cm (—), sur un vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies sans aménagement, au cours de la saison 1989-1990. Les points (+) représentent les valeurs mesurées sur le terrain.

Estimation of the soil water content between 0 and 100 cm depth (—), on degraded vertisol, cultivated with rainy season sorghum, without specific management, for the 1989-1990 rainy season. The points (+) represent the experimental field data.

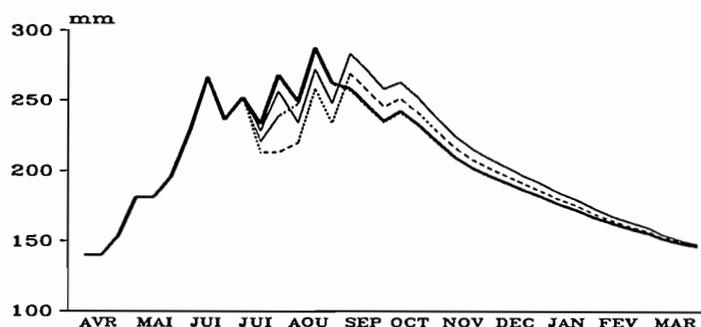


FIG. 7. — Simulation de l'évolution de la réserve hydrique totale de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies (—), avec des hauteurs précipitées pour les deuxième et troisième décades de juillet et la première décade d'août inférieures de 20 % (---), 50 % (...) et 80 % (-.-) par rapport à celles de l'année 1989.

Simulation of the soil water content between 0 and 100 cm depth, for a rainy season sorghum cultivation (—), with a rainfall amount decreased by 20% (---), 50% (...), and 80% (-.-) for the 3 ten-day periods of July, 10 to August, 10 in comparison of the same period in 1989-1990 season.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans le cadre de travaux sur la réhabilitation des vertisols dégradés, l'amélioration du régime hydrique apparaît primordiale. Les petits aménagements hydroagricoles testés sur les faciès les plus dégradés, encore appelés sols hardés, n'ont pas donné de résultats très nets concernant les quantités d'eau stockées. En revanche, dans le cas de vertisols présentant encore des fentes de retrait en début de saison sèche, l'humectation en profondeur est assurée et augmentée par des traitements qui concentrent au maximum l'eau ; les pratiques les plus appropriées semblent être alors les aménagements de type « casiers » qui captent entièrement les hauteurs précipitées grâce à un carroyage serré de diguettes. La modélisation a fait apparaître l'importance des fentes de retrait en prenant en considération un seuil de fermeture et d'ouverture du réseau fissural. Celui-ci détermine l'ampleur de l'humectation du sol en début de saison des pluies ainsi que la capacité à tamponner l'effet d'une sécheresse relative durant la saison des pluies. Il semble que les phénomènes de dégradation induisent non seulement la présence d'une épaisse croûte de battance, qui crée un obstacle à l'infiltration de l'eau, mais également une modification des comportements dans les horizons sous-jacents, avec notamment la réduction voire la disparition de la macroporosité fissurale.

Les principes d'une amélioration du régime hydrique en vue de la réhabilitation des vertisols dégradés doivent donc s'attacher plus spécifiquement aux causes liées à la disparition de cette macroporosité fissurale.

Les phénomènes de retrait et de gonflement des argiles sont, selon WILDING et TESSIER (1988), en étroite relation non seulement avec des propriétés intrinsèques des vertisols, mais également avec des caractéristiques environnementales. Ces phénomènes sont liés, d'après ces auteurs,

d'une part aux caractéristiques minéralogiques, chimiques et structurales des argiles présentes, d'autre part au climat et à l'histoire des stress d'origine climatique, à la topographie, à la végétation ainsi qu'aux systèmes de culture pratiqués sur ces sols.

TESSIER (1990) a montré que l'organisation interne des argiles, à tous les niveaux d'unité structurale, joue un rôle majeur dans les rapports de ces matériaux vis-à-vis de l'eau. Cette micro-organisation dépend non seulement des caractéristiques minéralogiques de la phase solide, mais aussi des propriétés de la solution de contact (PEDRO, 1987). Ainsi, d'après les travaux de TESSIER *et al.* (1980), les argiles de type smectite-Ca subissent des modifications de structure après une forte dessiccation, qui ont pour effet de diminuer les capacités de rétention en eau de ces argiles au cours d'une nouvelle phase d'humectation. Le dessèchement agirait ainsi de manière partiellement irréversible en agrégeant les particules originelles des matériaux argileux hydratés. Les méthodes récentes de rétractométrie établies par BRAUDEAU (1988), accompagnées d'une étude minéralogique approfondie des vertisols dégradés du bassin versant de Mouda, devraient permettre de répondre à ces questions sur l'état physico-chimique des argiles concernées dans ces sols.

Sur les sols hardés, après deux années d'expérimentation, la réacquisition d'un réseau fissural perdu pendant la phase de dégradation ne semble pas effective ; l'observation des horizons supérieurs n'a pas révélé de fissuration très nette en saison sèche. Les variations de teneur en eau obtenues par humectation ne sont pas suffisantes pour créer les mouvements de retrait et de gonflement, responsables de la présence d'une macroporosité fissurale dans les matériaux vertiques. Les stagnations d'eau en surface tant sur le « pitting » que sur les traitements « microcatchment » et « bandes alternées » en sont la démonstration.

Sur les vertisols moins dégradés, le fonctionnement durable de la macroporosité fissurale est assuré par des barrières imperméables à l'écoulement ; celles-ci maintiennent une charge hydraulique élevée dans les fentes de retrait, ce qui favorise l'humectation maximale et les mouvements de retrait et de gonflement des argiles. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus sur des sols à texture grossière, pour lesquels les aménagements de type filtrant sont les plus efficaces pour la gestion de l'eau et la conservation des sols (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1990 ; ROOSE, 1990 b ; ROOSE et RODRIGUEZ, 1990).

Les prochains travaux devront également considérer d'autres aspects pouvant favoriser l'humectation des sols les plus dégradés. Ils concernent essentiellement l'amélioration du statut organique et de la porosité biologique. Sur ce dernier point, SEINY BOUKAR (1990) indique que les

foyers de réactivation biologique du sol proviennent le plus souvent des ligneux. L'arbre, par l'action de son système racinaire, joue un rôle dans l'amélioration de la porosité biologique, favorisant ainsi l'humectation des horizons plus profonds (GROUZIS *et al.*, 1991). Des essais de réhabilitation de sols dégradés, menés par le Centre de recherche forestière de Maroua, ont effectivement montré l'efficacité de l'association arbre-diguette pour l'humectation en profondeur de sols extrêmement compacts de type planosols (EYOG MATIG, 1989). Les techniques d'agroforesterie (ROOSE, 1990 b ; FELLER *et al.*, 1993), notamment la jachère arborée améliorée (PELTIER, 1989), associées à des pratiques de conservation de l'eau, seraient ainsi, à l'heure actuelle, les méthodes les plus appropriées pour la réhabilitation des vertisols dégradés du Nord-Cameroun.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN (M. F.), 1988 — « Below-ground structure : a key to reconstructing a productive arid ecosystem ». In Allen (E. A.), éd. : *The reconstruction of disturbed arid lands: an ecological approach*, Boulder, CO, Westview Press : 113-135.
- ARONSON (J.), FLORET (C.), LE FLOC'H (E.), OVALLE (C.), PONTANIER (R.), 1993 — Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems of arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1 (1) : 8-17.
- BOLI (Z.), BEP A ZIEM (B.), ROOSE (E.), 1991 — Enquête sur l'érosion pluviale sous rotation intensive coton-céréale dans la région de Tcholliré (Sud-Est-Bénoué, Nord-Cameroun). *Bull. Réseau Érosion*, 11 : 127-138.
- BRABANT (P.), GAUVAUD (M.), 1985 — *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun (Provinces du Nord et de l'Extrême-Nord). Cartes à 1/500 000*. Paris, Orstom, coll. Notices explicatives, 103, 286 p.
- BRADSHAW (A. D.), 1987 — « Restoration: an acid test for ecology ». In Jordan (W. R.), Gilpin (M. E.), Aber (J. D.), éd. : *Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research*, Cambridge, Cambridge University Press : 23-29.
- BRAUDEAU (E.), 1988 — Méthode de caractérisation pédohydrrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 24 (3) : 179-189.
- CEE, 1988 — *Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final*. Contrat TSD A-216-CAM (DG12-CEE), Mesres-Orstom-CNRS.
- DONFACK (P.), 1992 — *Étude de la dynamique de la végétation après abandon cultural au Nord-Cameroun*. Thèse doct. 3^e cycle, univ. Yaoundé.
- DUDAL (R.), 1965 — Dark clay soils of tropical and subtropical regions. Rome, FAO, *Agricultural Development paper*, 83.
- ECKEBIL (J.-P.), BARRAULT (J.), VAILLE (J.), 1972 — Point des travaux de l'IRAT sur les sorghos repiqués du Nord-Cameroun. *Agron. Trop.*, 27 (8) : 791-814.
- EYOG MATIG (O.), 1989 — « Quelques tentatives de récupération des sols stériles. Plantations forestières dans le Nord-Cameroun ». In : *Proceedings of a regional seminar on Trees for development in Sub-Saharan Africa*, IFS (International Foundation for Science), february 20-25, 1989, Nairobi, Kenya.
- FELLER (C.), LAVELLE (P.), ALBRECHT (A.), 1993 — « La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion ». In : *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires, 494 p.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1982 — *L'aridité en Tunisie pré-saharienne*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 150, 544 p.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1984 — Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 131, *Actual. bot.* (2-3-4) : 265-275.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), SEINY BOUKAR (L.), 1991 — Plant-Soil-Water relationships in a sahelo-soudanian savannah : the case of Northern Cameroon vertisols. *Can. J. Soil Sci.* (à paraître).
- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977 — Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32 (1) : 7-11.
- GAUVAUD (M.), 1971 — Les sols « hardés » du Nord-Cameroun (sols halomorphes, sols lessivés, planosols, sols hydromorphes). Mise au point bibliographique. *Bull. Liaison*, thème B, 2 (Paris, Orstom) : 55-88.
- GROUZIS (M.), NIZINSKI (J.), AKPO (E.), 1991 — « L'arbre et l'herbe au Sahel. Influence de l'arbre sur la structure spécifique, la production de la strate herbacée et la régénération des espèces ligneuses ». In : *IV^e Congrès international des terres de parcours*, 22-26 avril 1991, Montpellier, France, 11 p.
- IRA-CNS, 1989 — *Réhabilitation et utilisation de terres marginales du Nord-Cameroun. Rapport de campagne 1989*.

- Projet CEE/Mesres/Ira/CNRS/Orstom TS 2A/0077/M(CD), 58 p.
- LAMACHÈRE (J.-M.), SERPANTIÉ (G.), 1990 — « 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 Kergrais (A.), Claude (J.), éd. : *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*. Journées scientifiques du réseau « Génie Para-Sécheresse » de l'Uref, Ouagadougou, 12-15 mars 1990, Paris, John Libbey Eurotext : 165-178.
- MASSE (D.), 1992 — *Amélioration du régime hydrique des sols dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord-Cameroun*. Thèse doct.-ing., INP, Toulouse, 187 p.
- MITCHELL (A. J. B.), 1987 — « Management problems of cotton on vertisols in the lower shire valley of Malawi ». In Latham (M.), Ahn (P.), Elliott (C. R.), éd. : *Management of vertisols under semi-arid conditions*, Bangkok, Ibsram, Proceedings, 6 : 221-229.
- OLIVRY (J.-C.), 1986 — *Fleuves et rivières du Cameroun*. Paris, Orstom, coll. Monographies hydrologiques, 9, 734 p.
- PEDRO (G.), 1987 — Géochimie, minéralogie et organisation des sols : aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 23 (3) : 169-186.
- PELTIER (R.), 1989 — *Les essais d'agroforesterie au Nord-Cameroun*. Nogent-sur-Marne, CTFT, Yaoundé, IRA, 42 p.
- PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEINY BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1984 — *Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun soumis à des averses contrôlées*. Yaoundé, Mesres-IRA-IRGM, 71 p.
- PONTANIER (R.), THEBE (B.), 1989 — Étude du ruissellement au Nord-Cameroun, transfert de la parcelle au bassin versant. *Hydrol. Continent.*, 4 (1) : 57-69.
- ROOSE (E.), 1990 a — *Dégradation, érosion et restauration des sols sous culture intensive dans la zone cotonnière du Nord-Cameroun*. Rapport de mission, Cirad-IRA-Orstom, 20 p.
- ROOSE (E.), 1990 b — Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne. Définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. *Bull. Réseau Érosion*, 10 : 98-107.
- ROOSE (E.), 1992 — « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols. Influence du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale ». In Le Floch (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.
- ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.), 1990 — *Aménagement de terroirs au Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso). Quatre années de GCES. Bilan et perspectives*. Ouahigouya, CRPA, Montpellier, Orstom, 40 p.
- SEINY BOUKAR (L.), 1990 — *Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun*. Thèse 3^e cycle, univ. Yaoundé, 226 p.
- SEGHIERI (J.), 1990 — *Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-Cameroun*. Thèse doct., USTL, Montpellier, 200 p.
- SERPANTIÉ (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.), VALENTIN (C.), 1992 — « La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions ». In Le Floch (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 419-448.
- TESSIER (D.), 1990 — « Behaviour and microstructure of clay minerals ». In De Boodt (M.), Hayes (M.), Herbillon (A.), éd. : *Soil colloids and their associations in aggregates*, New York, Plenum Press : 387-415.
- TESSIER (D.), CAMARA (L.), PEDRO (G.), 1980 — Sur le comportement hydrique et l'évolution des organisations des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sciences*, Paris, 290, D : 1169-1172.
- THEBE (B.), 1987 — *Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles*. Thèse doct., USTL, Montpellier, 306 p.
- VAILLE (J.), 1970 — Essais de mise en valeur des sols « hardés » du Nord-Cameroun. *Agron. Trop.*, 25 (5) : 472-490.
- WILDING (L. P.), TESSIER (D.), 1988 — « Genesis of vertisols: shrink-swell phenoma ». In Wilding (L. P.), Puentes (R.), éd. : *Vertisols : their distribution, properties, classification, and management*, Texas A & M University Printing Center, College Station : 55-81.

Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin

Anastase AZONTONDE

Centre national d'agropédologie (Cenap), BP 988, Cotonou, Bénin.

RÉSUMÉ

Sur les plateaux du Sud-Bénin, région de terres de barre à climat soudano-guinéen caractérisé par une pluviosité comprise entre 1 000 et 1 200 mm, la forte pression démographique a entraîné la dégradation des sols. Cette étude fait état de l'utilisation sans grand succès de certaines techniques antiérosives et de régénération de ces terres ; car l'ensemble des résultats obtenus à travers treize ans (1975-1988) d'expérimentation prouve que la plupart des techniques antiérosives et de restauration appliquées sur les parcelles d'essai n'ont pas pu relever la fertilité de ces terres. Cependant, la nouvelle technique mise en essai depuis 1988, qui consiste à cultiver dans une courte jachère de 7 à 8 mois une légumineuse à port rampant (*Mucuna pruriens* variété utilis) puis à cultiver l'année suivante le maïs semé directement sur la même parcelle, permet d'augmenter notablement le rendement en maïs et de réduire très sensiblement le ruissellement. Les résultats ont montré que le traitement qui renouvelle *Mucuna* tous les ans en association avec le maïs relève le taux de matière organique (0,6 à 2,8 %) pendant que le rendement en maïs passe de 0,2 à 2,8 t/ha/an, que l'érosion diminue de 7,5 à 2 t/ha/an et le ruissellement de 10 % à 5 % de la pluviosité en cinq ans.

Cette méthode a été intégrée ensuite en milieu paysan et a donné de grands espoirs dans cette zone densément peuplée (200 à 400 habitants au kilomètre carré).

MOTS CLÉS : Bénin — Conservation des sols — Restauration des sols — Matière organique — *Mucuna* — Jachère courte — Érosion — Ruissellement — Productivité des terres.

ABSTRACT

DEGRADATION AND RESTORATION OF "TERRES DE BARRE" IN BENIN

In the plateaux of South Benin which is an area of oxisols "terres de barre" with a Sudano-Guinean climate characterized by rainfalls ranging from 1,000 to 1,200 mm, the strong population pressure led to soil degradation. This study takes into account some soil conserving and regeneration techniques which did not give favourable results. The whole results obtained by experiments conducted through thirteen years (1975-1988) prove that most of the soil conservation and restoration techniques used in experimental plots could not raise soil fertility. However, the new technique which has been tested since 1988 and which consists in cultivating in a short fallow of 7 to 8 months a sprawling leguminous plant (*Mucuna pruriens* variety utilis) and in cultivating in the following year the maize sown directly in the same plot, allows to increase considerably the maize yield and to reduce considerably runoff. Results showed that the treatment which changes *Mucuna* every year in association with maize raises the organic matter rate (0.6 to 2.0 %), while the maize yield increases from 0.2 to 2.8 t/ha/year, erosion decreases (7.5 to 2 t/ha/year) and runoff decreases from 10 % to 5 % of rainfall within five years.

This method was then applied to rural zones and gave great hope in this densely populated zone (200-400 inh./km²).

KEYWORDS : Benin — Soil conservation — Soil restoration — Organic matter — *Mucuna* — Short fallow — Erosion — Runoff — Soil productivity.

RESUMEN

DEGRADACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LAS « TERRES DE BARRE » EN BENÍN

*En las mesetas del Sur de Benín que es una región de « terres de barre » (suelos ferrallíticos) con un clima sudanés-guineano caracterizado por lluvias comprendidas entre 1 000 y 1 200 mm, la fuerte presión demográfica ha provocado la degradación de los suelos. Ese estudio tiene en cuenta ciertas técnicas de lucha contra la erosión y de regeneración de esas tierras que fueron utilizadas sin dar muchos resultados. El conjunto de los resultados obtenidos a través de trece años de experimentación (1975-1988) demuestra que la mayoría de las técnicas de lucha contra la erosión y de restauración aplicadas en las parcelas de prueba no han podido subir la fertilidad de esas tierras. Sin embargo, la nueva técnica que ha sido experimentada desde 1988 y que consiste en cultivar en un barbecho de siete a ocho meses de duración una leguminosa rastrera (*Mucuna pruriens* variedad *utilis*) y en cultivar el año siguiente el maíz sembrado directamente en la misma parcela permite aumentar considerablemente el rendimiento del maíz y reducir considerablemente la arroyada. Los resultados han mostrado que el tratamiento que renueva el *Mucuna* todos los años en asociación con el maíz aumenta la tasa de materia orgánica (0,6 a 2,0 %) mientras que el rendimiento del maíz aumenta de 0,2 a 2,8 t/ha/año, la erosión disminuye (7,5 a 2 t/ha/año) y la arroyada disminuye de 10 % a 5 % de las lluvias dentro de cinco años.*

Ese método ha sido aplicado en las zonas rurales y ha dado grandes esperanzas en esa zona con una población densa (200-400 hab./km²).

PALABRAS CLAVES : Benín — Conservación de los suelos — Restauración de los suelos — Materia orgánica — *Mucuna* — Barbecho corto — Erosión — Arroyada — Suelos producción.

INTRODUCTION

Le Bénin est un pays à forte densité de population, avec un relief peu accidenté en général mais constitué du sud au nord de trois types de modelés : tabulaire, vallonné et chaotique.

Les sols ferrallitiques désaturés du Sud-Bénin, appelés terres de barre (*barro* = argile sableuse à l'état humide en portugais), occupent la quasi-totalité des terrains exondés bien drainés de cette partie du pays. Ils représentent 7 % de la superficie du pays mais concentrent le tiers de la population totale.

Cette forte pression démographique (200 à 400 habitants au kilomètre carré) réduit considérablement la durée des jachères ; ce qui entraîne une dégradation des sols en raison de leur surexploitation consécutive à l'action conjuguée des feux de brousse et de l'exploitation agricole.

Cette dégradation qui affecte tous les sols des plateaux méridionaux du Bénin a pour principales causes l'exportation des nutriments par les récoltes, la baisse importante du taux de matière organique qui modifie le cycle de l'azote (DABIN, 1956), les pertes par ruissellement, érosion et lixiviation, l'acidification du sol qui entraîne la toxicité aluminique.

Elle engendre une importante perte des ressources en sols agricoles et contribue à augmenter le flux des importations de céréales.

Conscient de ce problème de dégradation des ressources naturelles du Bénin, le département du Développement rural, à travers l'Institut national des recherches agricoles du Bénin (Inrab), a développé des stratégies et plans

d'action visant à encourager les recherches sur l'environnement et plus particulièrement sur la lutte antiérosive et la régénération de la fertilité de ces sols. Des programmes de recherche ont été élaborés et mis en exécution en 1975 sur des parcelles d'érosion qui fonctionnaient depuis 1964. Le phénomène de la dégradation des terres de barre est étudié dans le cadre de la recherche des techniques anti-érosives les plus efficaces et les plus régénératrices de la fertilité des sols.

L'objectif de cette étude est de mettre au point un système de culture qui puisse restaurer la productivité des terres de barre et permettre leur gestion durable.

La méthode utilisée est la comparaison des effets anti-érosifs et l'amélioration de la productivité des sols par différents systèmes de culture.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le site des essais est Agonkamey, au Sud-Bénin, où le climat soudano-guinéen est caractérisé par deux saisons sèches (durée de 2 mois et 4 mois) et deux saisons pluvieuses alternées ; la pluviosité varie entre 1 000 et 1 200 mm.

Deux séries d'essais ont été mises en place sur sept parcelles d'érosion : la première a duré de 1975 à 1988, la seconde a démarré en 1989 et se poursuit encore.

Ces essais se sont déroulés sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, développés sur des matériaux sédimentaires argilo-sableux du continental terminal (CPCS, 1967 ; VOLKOFF et WILLAIME, 1976 ; VOLKOFF, 1976).

Ils sont communément appelés « terres de barre ».

Le profil moyen est caractérisé par les horizons suivants :

— un horizon humifère (0-10 cm), brun-rougeâtre (5YR 4/4 à sec), sablo-limoneux, très perméable, avec une structure particulière à grumeleuse contenant de nombreuses racines fines et moyennes ; transition distincte et régulière ;

— un horizon moins humifère (10-20 cm), rouge-brun (5YR 4/6 à sec), limono-sableux à limono-argilo-sableux, bien perméable ; structure polyédrique subangulaire fine comportant d'assez nombreuses racines fines et moyennes ; transition distincte et régulière ;

— un horizon (20-60 cm), rouge (2,5YR 4/6 à sec), argilo-sableux, perméable, bien structuré en polyèdres fins à moyens avec d'assez nombreuses racines ; l'activité biologique est intense dans tout le profil et les racines vont à plus d'un mètre de profondeur.

Dispositif expérimental

À Agonkanmey (2° 20' est ; 6° 24' nord ; 20 m d'altitude), les parcelles d'érosion ont été installées par l'Orstom en 1964. Il s'agit de quatre parcelles (R₁, R₂, R₃, R₄) de forme rectangulaire (30 m x 5 m), d'une pente de 4 % légèrement concave, délimitées par des tôles en fer larges de 30 cm, enfoncées dans le sol sur une profondeur de 10 cm.

Elles se terminent en aval par une gouttière en béton qui draine les eaux et l'érosion dans deux cuves de capacité comprise entre 2 et 3 m³. Ces cuves sont reliées entre elles par un canal servant à évacuer l'eau après échantillonnage.

Sur le plateau adja (milieu paysan, à 30 m d'altitude et à 120 km au nord d'Agonkanmey), trois parcelles (P₁, P₂, P₃) identiques aux quatre premières ont été installées en 1975 par le Centre national d'agropédologie. L'historique des parcelles avant la mise en place des essais est retracé dans le tableau I.

TABLEAU I
État des parcelles (de 1964 à 1974) avant l'étude
Status of runoff plots (1964-1974) before study

Parcelles paysannes	Traitements	Erosion (t/ha)	Coef. ruiss. (%)	M.O. (%) en 1974 (0-10 cm)	Rendt. (t/ha) en 1974
p ₁	Défriche + brûlis + 2 sarclages; culture: 2 ans de maïs	10,5	6	1,8	1,5
p ₂	Défriche + brûlis + 2 sarclages; culture: 5 ans de maïs	25	15	1,4	0,8
p ₃	Défriche + brûlis + 2 sarclages; culture: 5 ans de maïs	20,5	9	1,8	non déterminé
Parcelles recherche					
R ₁	jachère: 1 an, sol nu sans culture: 1 an, maïs sur butte + 2 sarclages: 2 ans; maïs sur billons // + 2 sarclages: 7 ans	30	16	1,3	0,5
R ₂	jachère: 1 an, sol nu sans culture: 1 an, labour à la houe à plat + 2 sarclages: 9 ans de maïs.	23	15	1,3	0,6
R ₃	jachère: 1 an, sol nu sans culture 1 an, maïs et arachide sans labour: 9 ans	15	9	1,8	1,2
R ₄	jachère naturelle: 10 ans	non déterminé	non déterminé	non déterminé	non déterminé

Mesure du ruissellement et de l'érosion

Le ruissellement est évalué à partir de mesures de hauteur d'eau dans les cuves (moins la lame de pluie).

La terre de fond est recueillie, pesée sur place et échantillonnée pour la détermination de l'humidité au laboratoire.

La terre fine en suspension est évaluée à partir d'un échantillon composite formé de prises d'un litre dans chaque lame de 10 cm de chacune des cuves.

Traitements réalisés

Trois séries de traitements ont été réalisées depuis la construction des parcelles.

TRAITEMENTS RÉALISÉS DE 1964 À 1974

Le détail de ces traitements est consigné dans le tableau I.

En milieu paysan, toutes les parcelles (P_1 , P_2 , P_3) ont subi en première année un défrichage suivi de brûlis avant le semis du maïs.

Sur parcelles (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) de recherche, pas de brûlis après le défrichage de la jachère d'un an.

TRAITEMENTS RÉALISÉS DE 1975 À 1988

Six parcelles ont été mises en essai.

Les traitements subis par ces parcelles de 1975 jusqu'en 1988 se résument comme suit.

En milieu paysan

- D = LEFGSS : labour à la houe sur 10 cm + enfouissement de 10 t/ha de fumier la première année et 5 t/ha les années suivantes + deux sarclages sur 5 cm ; culture : maïs.

- T2 = LPSS : labour à la houe sur 10 cm à plat (témoins améliorés) + deux sarclages sur 5 cm ; culture : maïs.

- B = LESSS : labour à la houe sur 10 cm + enfouissement de *Stylosanthes* + deux sarclages sur 5 cm ; culture : maïs.

En station de recherche à Agonkanmey

- T1 = GBSS : grattage à la houe sur 5 cm + brûlis (témoin traditionnel) + deux sarclages ; culture : maïs.

- C = T1 (GBSS) + résidus de récolte à la surface du sol ; culture : maïs.

- A = LBSS : labour à la houe sur 10 cm + billonnage isohypse + deux sarclages sur 5 cm ; culture : maïs.

TRAITEMENTS RÉALISÉS DE 1988 À 1993

En milieu paysan

- P_1 = sur la parcelle P_1 : labour à plat sur 10 cm + deux sarclages ; culture : maïs.

- P_2 = sur la parcelle P_2 : traitement E2p ; renouvellement de *Mucuna* tous les deux ans ; culture de maïs tous les ans avec un grattage et deux sarclages sur 5 cm.

- P_3 = la parcelle P_3 porte le traitement E1p qui renouvelle *Mucuna* et le maïs tous les ans avec un grattage et deux sarclages.

En station de recherche à Agonkanmey

- La parcelle R_1 porte le traitement T : grattage à la houe + brûlis + deux sarclages ; culture : maïs.

- La parcelle R_2 porte le traitement E2 : renouvellement de *Mucuna* tous les deux ans et du maïs tous les ans, avec un grattage avant le semis du maïs, un autre avant le semis de *Mucuna*, puis un sarclage à la floraison du maïs.

- Le traitement E3 sur la parcelle R_3 consiste à apporter la fumure minérale NPK (15-15-15) à raison de 200 kg/ha et 100 kg/ha d'urée ; il comporte également un grattage et deux sarclages. Ce traitement procure à la parcelle 75 kg d'azote, 30 kg de P_2O_5 et 30 kg de K_2O à l'hectare.

- La parcelle R_4 porte le traitement E1 : renouvellement de *Mucuna* et du maïs tous les ans avec, chaque année, un grattage et deux sarclages.

Mucuna pruriens variété *utilis* (AZONTONDE, 1994) est une légumineuse annuelle à port rampant originaire de l'Asie (PURSEGLOVE, 1968). Une forme sauvage se trouve au Sud-Bénin (et ailleurs en Afrique). Elle a la réputation d'une mauvaise herbe qui cause de fortes démangeaisons au contact de la peau. Mais la variété *utilis* est une forme non urtiquante sélectionnée comme culture de couverture pour remettre les sols en condition. Elle est semée après le premier sarclage entre les lignes, 30 jours après le semis du maïs, à un écartement de 0,80 m x 0,80 m à raison d'une graine par poquet. Elle se développe ensuite lentement sous le maïs, puis rapidement après la récolte, se dessèche 6 à 7 mois après le semis. Un grattage à la houe sur 5 cm l'année suivante suffit pour semer le maïs après les premières pluies.

Le traitement E2 permet au paysan d'exploiter une fois sur deux la seconde saison des pluies.

Prélèvements de sol et méthodes analytiques

Chaque traitement a fait l'objet d'une description de profil et de prélèvements d'échantillons moyens (de 6 prélèvements) pour trois épaisseurs de sol (0-10, 10-20, 20-40 cm). Ces prélèvements se font à l'époque du semis en avril.

Les mesures du pH eau sont faites sur une suspension dans un rapport sol/solution de 1/2,5.

Le carbone organique (C) est déterminé par la méthode de WALKLEY et BLACK (1934).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats dont nous donnons ici la fourchette de variation de 1975 à 1988, faute de répétition des traitements dans l'espace, sont consignés dans les tableaux II et III.

Effets du grattage léger, du billonnage isohypse et des résidus de récolte sur l'érosion, le ruissellement, le taux de matière organique et le rendement

Les résultats indiqués dans le tableau III montrent que le sarclage léger traditionnel avec brûlis et le paillage avec les résidus secs de la récolte sont deux traitements qui, durant les quatorze années, ont contribué à amplifier le phénomène d'érosion (fig. 1).

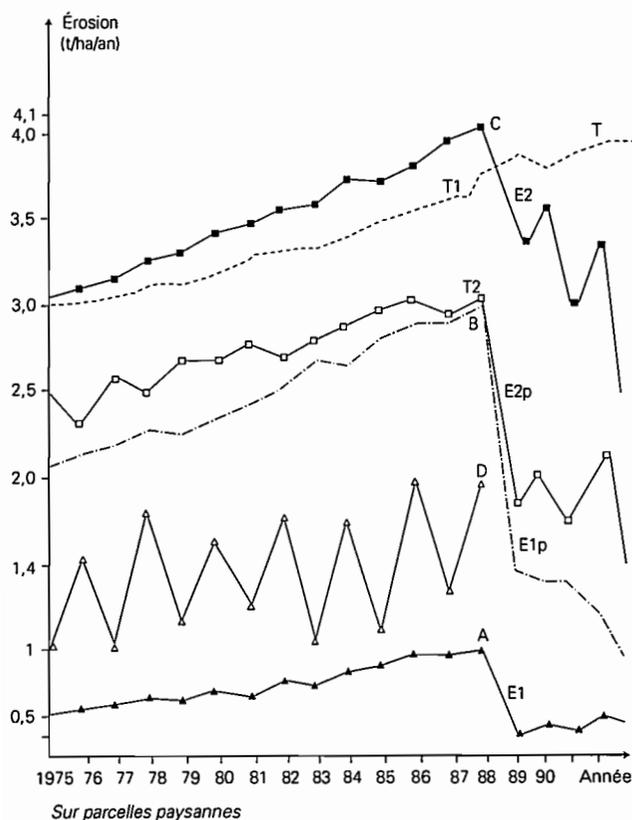
Le coefficient de ruissellement a augmenté de 35 à 45 % sur parcelle à résidus de récolte puis de 51 à 56 % sous grattage léger (ROOSE, 1976). Pendant cette période, les stocks organiques eux baissent de 1,3 à 0,6 % sous paillage de résidus de récolte et de 1,4 à 0,8 % sous grattage léger traditionnel. Les rendements évoluent dans le même sens ; ils sont passés de 0,4 à 0,2 t/ha, soit une diminution de 50 %, sous sarclage léger et de 2,1 à 0,6 t/ha, soit une

TABLEAU II
Effets des traitements sur l'érosion, le ruissellement et le rendement en maïs grain
sur les parcelles d'érosion (Agonkamey, 1975-1988)
Effects of different treatments of runoff plots on erosion runoff and maize grain yield (Agonkamey, 1975-1988)

Parcelles	Traitements	Erosion (t/ha)	Ruisselt. (%)	M.O. (%) 0-10 cm	Rendt. (t/ha)
P ₁	B engrais vert + enfouissement Stylosanthès	20 à 30	25 à 35	1,3 à 0,9	2,5 à 0,5
P ₂	D enfouissement fumier 5-10 t/ha	10 à 20	20 à 30	3,3 à 3,0	4,0 à 3,0
P ₃	T2 Labour à plat	25 à 30	25 à 35	1,5 à 0,8	1,3 à 1,0
R1	A Labour + billonnage isohypse	10 à 6	8 à 12	1,8 à 0,6	3,5 à 0,2
R2	T1 grattage léger	35 à 40	51 à 56	1,4 à 0,8	1,3 à 0,6
R3	C Résidus de récolte en andain à la surface du sol	30 à 40	35 à 45	1,3 à 0,6	2,1 à 0,5

TABLEAU III
Influence de *Mucuna* sur la teneur en matière organique et le rendement en maïs grain des « terres de barre »
sur les parcelles d'érosion (Agonkamey, 1988-1993)
Effects of Mucuna on organic matter content and yield of maize grain in runoff plots on "terres de barre" of Benin (1988-1993)

Traitements	T témoin sans engrais, sans <i>Mucuna</i>		E1 <i>Mucuna</i> 1/an		E2 <i>Mucuna</i> 1/2 ans		E3 NKP (200 kg/ha + 100 kg/ha urée)	
	1988	1993	1988	1993	1988	1993	1988	1993
PH eau	4,9	4,8	5,1	5,2	5,3	5,2	5,5	5,3
Taux M.O. (C x 1,73) (%)	1,6	0,8	0,6	2,2	0,6	1,0	0,8	1,0
Rendement maïs (t/ha)	1,3	0,6	0,2	2,8	0,2	1,1	0,5	2,0
Erosion (t/ha)	35	45	7,8	2,0	20	15	pas de mesure (milieu paysan)	
Ruissellement (%)	50	55	10	5	30	25	pas de mesure (milieu paysan)	



Sur parcelles paysannes

B = labour + enfouissement d'engrais vert de *Stylosanthes* + 2 sarclages ; après 1988, maïs-*Mucuna* (E1p), *Mucuna* semé entre les lignes de maïs tous les ans.
D = labour + enfouissement fumier, 10 t/ha 1re année et 5 t/ha par la suite.
T2 = labour à plat avec brûlis ; après 1988, maïs-*Mucuna* tous les deux ans.

Sur parcelles de recherche

A = labour + billonnage isohypse à la houe ; après 1988, maïs-*Mucuna* (E1) avec *Mucuna* semé directement entre les lignes de maïs tous les ans.
C = labour + épandage de résidus secs de récolte à la surface du sol ; après 1988, *Mucuna* maïs-*Mucuna* (E1) avec *Mucuna* semé directement entre les lignes de maïs tous les ans.
T1 = sarclage léger avec brûlis ; après 1988, T = T1.

FIG. 1. — Évolution de l'érosion sous les différents traitements : T1, T2, A, B, C, D, E.

Rainfall erosion change under different treatments: T1, T2, A, B, C, D, E.

baisse de 76 %. Ces deux pratiques culturales protègent donc mal le sol et contribuent à son épuisement. Quant au labour isohypse, il réduit considérablement le ruissellement (Kram : 8 à 12 %). Cependant, le stock organique n'a pas pu être maintenu à un niveau acceptable ; il est passé de 1,8 à 0,6 %, soit une baisse de 67 % tandis que les rendements diminuaient de 3,5 à 0,2 t/ha. Ces résultats sont à rapprocher de ceux de PFEIFFER (1988) qui note que les rendements en maïs sans apport de fumure peuvent passer en moyenne de 2 300 kg/ha après une friche arbusculaire à seulement 700 kg/ha après trois saisons agricoles.

Seule la parcelle labourée avec enfouissement de fumier donne des résultats intéressants ; puisque le ruissellement est réduit à 20 ou 30 %, le stock organique est maintenu à un taux élevé de 2 à 3 % et les rendements se maintiennent à 3-4 t/ha (fig. 2 et 3).

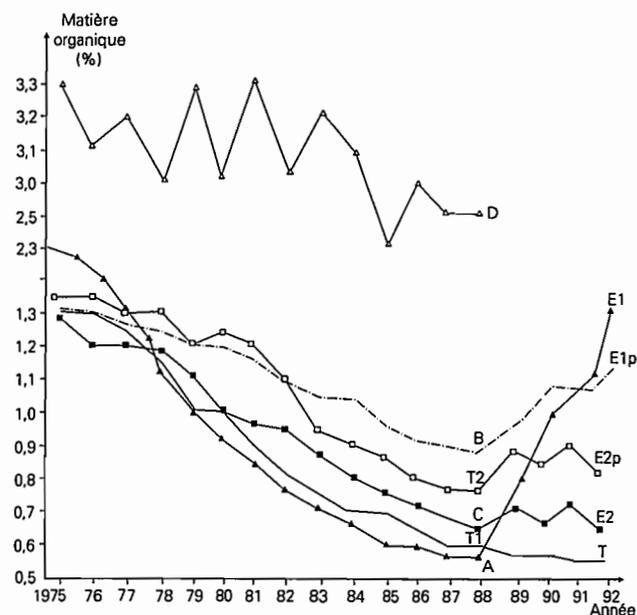


FIG. 2. — Évolution de la matière organique (%) sous les différents traitements : T1, T2, A, B, C, D, E (même légende que fig. 1).

Organic matter content (%) change under different treatments: T1, T2, A, B, C, D, E.

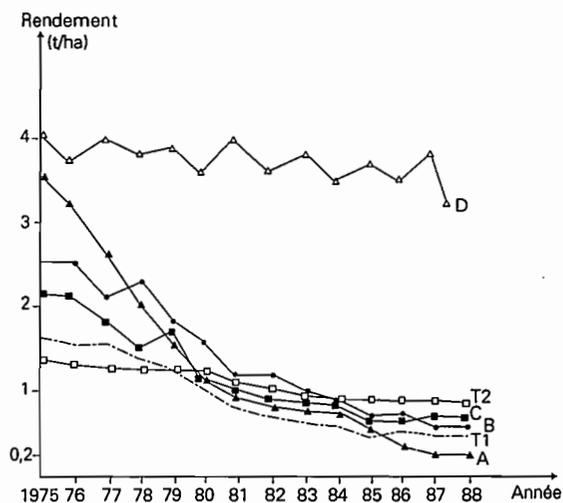


FIG. 3. — Évolution du rendement en maïs grain sous les différents traitements : T1, T2, A, B, C, D, E (même légende que fig. 1).

Maize yield change under different treatments: T1, T2, A, B, C, D, E.

De ces résultats, on peut tirer quelques conclusions. Le grattage léger avec brûlis aboutit à la destruction de la matière organique, à la dénudation du sol et à une augmentation du ruissellement. ROOSE, en 1973, note que le travail régulier du sol et la moins bonne protection des sols contre l'agressivité des pluies favorisent la destruction des agrégats, l'encroûtement et peuvent augmenter les risques d'érosion en nappe. La chute du rendement en est une conséquence évidente (LAL, 1976 ; MBAGWU, 1985).

Les résidus de récolte (environ 1 t/ha) ont été insuffisants pour assurer au sol une protection contre l'érosion et conserver le stock organique (SEDOGO, 1981) ; les rendements et les taux de matière organique ont donc régulièrement diminué pour se retrouver 14 ans après à un niveau critique (0,4 %). ROOSE, en 1973, a obtenu des résultats similaires sur des sols ferrallitiques semblables en Côte d'Ivoire. FELLER et MILLEVILLE, en 1977, avaient abouti à un résultat similaire en étudiant l'évolution des sols défrichés dans la région des Terres neuves du Sénégal.

Le labour isohypse réduit fortement l'érosion ; mais, au lieu d'entraîner une forte réduction des pertes de matière organique en conservant la fertilité des sols, ce labour conduit au contraire à une chute du stock organique et des rendements (fig. 2 et 3). Cela s'expliquerait par une accélération de la minéralisation de la matière organique dans les billons où la température et la porosité sont souvent assez élevés. Le billonnage isohypse semble une très bonne technique de lutte antiérosive, mais il ne suffit pas pour conserver la fertilité de ces sols.

L'apport de fumier à raison de 10 t/ha la première année et 5 t/ha tous les deux ans par la suite a enrichi le sol en matière organique sur les vingt premiers centimètres. Après cinq ans, la teneur en matière organique de cette couche est encore de 3 %.

Cependant, on constate des variations importantes dans les taux de carbone tous les deux ans. Cela serait dû au mode de prélèvement à des endroits différents, à la préparation des échantillons ou à l'arrivée des pluies intenses juste après l'apport ; ces pluies entraînent une partie du fumier.

Néanmoins, l'apport du fumier réduit l'érosion, probablement à cause de la création du complexe organo-minéral qui stabilise les agrégats et protège le sol contre la battance. Mais cette technique n'a pas pu être adoptée par les paysans qui, n'étant pas dans une zone d'élevage, l'ont trouvée trop contraignante malgré tous les efforts de la vulgarisation. La pratique du zaï (ROOSE, 1994) aurait certainement permis d'économiser le fumier en concentrant localement les apports aux poquets.

Le problème de la dégradation des terres de barre sous culture reste donc entier. En treize ans, les conditions de culture ont profondément modifié le comportement des sols vis-à-vis des cultures en réduisant nettement leur capacité de production (FAUCK *et al.*, 1969 ; SIBAND, 1972).

Nous avons décidé d'essayer *Mucuna pruriens* variété *utilis* pour deux raisons fondamentales :

— cette plante est une légumineuse qui fournit de la matière organique et de l'azote au sol ;

— elle se développe rapidement, couvre bien le sol, produit beaucoup de semences et 9 à 10 tonnes de matière sèche au bout de 5 à 6 mois.

Effets de *Mucuna pruriens* variété *utilis* sur le ruissellement, le taux de matière organique et le rendement en maïs grain

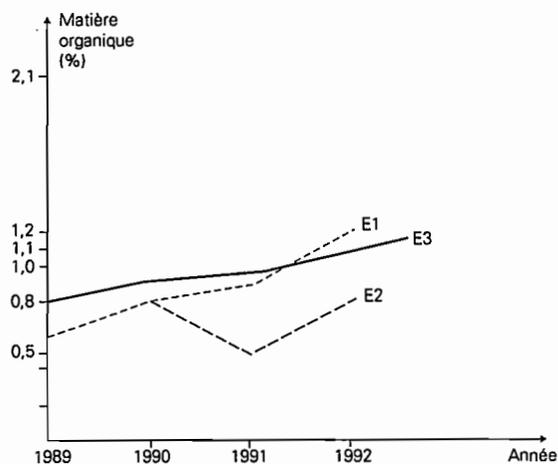
Les résultats sont consignés dans le tableau III sous forme de fourchette de variation de 1988 à 1993.

De ces résultats, il ressort que, d'une part, sur la parcelle témoin (T) sans engrais minéral et sans *Mucuna*, le ruissellement annuel moyen est passé de 50 à 55 % ; d'autre part, l'acidité du sol a légèrement augmenté (4,9 à 4,8), tandis que le taux de matière organique a baissé de 0,6 à 0,5 % et le rendement en maïs grain de 1,3 à 0,6 t/ha. Ces effets sont dus à la faiblesse des restitutions organiques de la culture continue sur brûlis ; ils ont été observés également en conditions tropicales dans d'autres types de sols (BOYER, 1970 ; ROOSE, 1973 ; BACYE, 1993). Les quelques résidus qui ont échappé au feu sont émiettés par les termites et transportés dans les bas-fonds par le ruissellement. Conséquence : le sol se dénude progressivement puis se dégrade. La dégradation de la terre de barre se poursuit donc sous culture traditionnelle sur brûlis et les risques d'érosion augmentent.

Le traitement E2 qui renouvelle *Mucuna* tous les deux ans avec culture du maïs n'a pas entraîné une variation notable du pH (5,3 à 5,2) en cinq ans ; en revanche, il a amélioré le taux de matière organique du sol (0,6 à 0,9 %) et le rendement en maïs grain (de 200 à 1 100 kg/ha) (fig. 4).

Dans le même temps, le ruissellement diminue de 30 à 25 %. L'érosion baisse de 25 %. Cet accroissement de matière organique et du rendement induit par le traitement E2 est dû à la biomasse végétale et racinaire de *Mucuna*, qui exerce le triple rôle de source de matière organique, de protection du sol contre l'érosion et d'augmentation de l'activité des vers de terre qui réduit le ruissellement. On en déduit que le traitement qui apporte *Mucuna* tous les deux ans est une pratique qui peut restaurer à long terme la fertilité du sol.

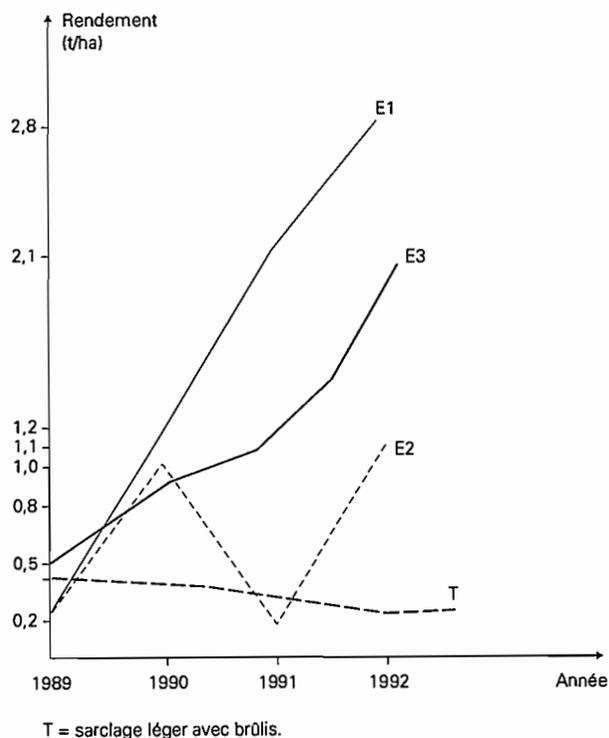
L'apport de la fumure minérale (NPK) dans le traitement E3 entraîne en cinq ans une légère baisse de pH (5,5 à 5,3) (tabl. III) ; mais le taux de matière organique double (0,8 à 1,6 %) et le rendement s'accroît remarquablement (0,5 à 2,5 t/ha) (fig. 5). Cette action bénéfique de la fumure minérale (NPK) sur le relèvement du taux de matière organique et du rendement a été décrite par RUFYIKIRI et HENNEBERT en 1994. L'augmentation du stock minéral



E1 = système maïs-*Mucuna* ; *Mucuna* semé entre lignes de maïs/an.
 E2 = système maïs-*Mucuna* ; idem maïs tous les 2 ans.
 E3 = système maïs en continu + fumure minérale NPK
 (200 kg/ha NPK + 100 kg/ha d'urée) (sans *Mucuna*).

FIG. 4. — Influence de *Mucuna* sur l'évolution du taux de matière organique.

Mucuna effects on organic matter content.



T = sarclage léger avec brûlis.

FIG. 5. — Influence de *Mucuna* sur l'évolution du rendement en maïs grain (même légende que fig. 4).

Mucuna effects on maize yield.

(NPK) disponible pour la plante entraîne l'augmentation de la biomasse et, par conséquent, du taux de matière organique du sol. WERTZ (1979) avait déjà remarqué, au cours de ses recherches sur les terres de barre, que l'apport de la fumure minérale se traduisait par une augmentation significative du rendement et, dans une moindre proportion, du taux de matière organique. Mais la production en maïs grain qu'entraîne ce traitement ne permet pas au paysan d'assurer les frais d'engrais et sa subsistance au cours de l'année. Car deux tonnes de maïs grain pour les deux saisons de l'année équivalent à 20 sacs ; or le paysan et sa famille consomment au minimum 18 sacs de maïs par an ; il ne peut donc vendre que deux sacs à 20 000 F CFA au plus. Les frais d'engrais NPK et urée (quatre sacs de NPK et deux sacs d'urée) lui reviennent à 40 000 F CFA. Ce qui représente un déficit de 20 000 F CFA chaque année que le paysan n'arrive à combler qu'après la vente des produits de sa palmeraie. Cela justifie la non-adoption de ce traitement par les paysans.

Le traitement E1 qui renouvelle *Mucuna* tous les ans n'entraîne pas une variation importante du pH (5,1 à 5,2) dans la parcelle, mais il accroît nettement le taux de matière organique du sol (0,6 à 2,0 %) (fig. 4) et les rendements (200 kg/ha en 1988 à 2 800 kg/ha en 1993), tandis que les risques de ruissellement ($K_r = 10$ à 5 %) et d'érosion diminuent (7,8 à 2,0 t/ha) (tabl. III).

Au Mexique, des résultats similaires ont été obtenus ; *Mucuna* a pu raccourcir l'occupation de la terre en jachère traditionnelle de dix ans environ à une année seulement (BUNCH, 1986). La réduction du ruissellement et l'augmentation si rapide des rendements en maïs qu'entraîne le système maïs-*Mucuna* sont dues à l'enrichissement du sol en matière organique et en azote, et à l'humidité qu'entretient dans le sol l'importante biomasse de *Mucuna*.

Cet effet de la végétation sur le relèvement du taux de matière organique et sur la protection du sol contre l'érosion a été observé par plusieurs auteurs (BOYER, 1970 ; CHARREAU, 1972 ; PIERI, 1989) qui ont étudié les jachères de longue durée.

À Ibadan, au Nigeria, AKOBUNDU *et al.*, en 1984, ont utilisé *Mucuna* pour contrôler le chiendent (*Imperata cylindrica*). KOUDOKPON et VERSTEEG (1991), en étudiant l'effet de *Mucuna* sur le relèvement de la fertilité du sol, concluent que cette légumineuse est la « solution des terres pauvres ». De nombreux paysans du plateau d'Aplahoué, dans le sud-ouest du Bénin, l'ont adoptée bien que ce système supprime la seconde campagne agricole ; car les rendements en maïs peuvent leur assurer l'autoconsommation et leur procurer de l'argent par la vente du surplus de maïs. Ils passent progressivement de 200 kg/ha en première année à 2 800 kg/ha après six ans. Avec cette production de 28 sacs de maïs, le paysan et sa famille peuvent vendre dix sacs à 100 000 F CFA après en avoir consommé dix-huit. Ils seraient alors en mesure d'apporter

100 kg/ha de fumure minérale NPK. Ce qui contribuerait à augmenter encore sa production en maïs jusqu'à près de 50 sacs.

CONCLUSION

Le billonnage isohypse est une technique très efficace dans la lutte antiérosive mais il n'améliore pas la fertilité du sol ; il réduit très sensiblement le ruissellement superficiel mais accroît le drainage interne et la lixiviation des éléments minéraux libérés au cours de la minéralisation ; cela appauvrit la couche du sol exploitable par les racines. Les rendements chutent malgré la bonne conservation de l'eau et du volume du sol.

Ce résultat nous amène à comprendre que les meilleures techniques antiérosives ne sont pas nécessairement les plus restauratrices des sols. L'apport d'engrais minéral NPK est intéressant puisqu'il entraîne un accroissement notable

des rendements en maïs grain, mais il n'a pas été adopté par les paysans des plateaux des terres de barre car cette pratique n'est pas rentable actuellement. Ils préfèrent les techniques biologiques et particulièrement les légumineuses grimpantes pour couvrir suffisamment le sol et l'enrichir également en matière organique et en azote. Dans le cas étudié, *Mucuna pruriens* variété *utilis*, cultivé tous les ans en association avec le maïs dans le système *Mucuna*-maïs, permet de réduire très sensiblement les risques de ruissellement et d'érosion, d'accroître notablement les taux de matière organique et la productivité en maïs des terres de barre.

Mais ce système qui, à court et moyen terme, enrichit le réservoir nutritif du sol en eau, matière organique et azote peut-il constituer à long terme une alternative à la fertilisation minérale azotée ?

C'est l'objectif que poursuivent les essais en cours sur les parcelles.

BIBLIOGRAPHIE

- AKOBUNDU *et al.*, 1984 — « Control of *Imperata cylindrica* ». In : *IITA Annual Report 1983*, Ibadan, IITA : 175-176.
- AZONTONDE (A.), 1994 — Dégradation et restauration des terres de barre au Sud-Bénin. *Bull. Réseau Erosion*, 14 : 38-60.
- BOYER (J. Y.), 1970 — *Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone*. Comité des sols tropicaux/Committee on Tropical Soils, Londres, 8-12 juin, Paris, Orstom, 175 p.
- BUNCH (R.), 1986 — « What we have learned to date about green manure crops for small farmers CIDICCO, Tegucigalpa, Honduras ». In : Koudopkon (V.), Versteeg (M.), *Mucuna... solution pour les terres pauvres et les champs envahis par les chiendents*.
- CHARREAU (C.), 1972 — Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par les cultures annuelles. *Agron. Trop.*, 27 : 905-929.
- CPCS, 1967 — *Classification des sols*. Rapport Ensa Grignon, 87 p.
- DABIN (B.), 1956 — Contribution à l'étude de la fertilité des terres de barre. *Agron. Trop.*, 11 (4) : 490-506.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (C.), 1969 — Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze ans de culture continue. *Agron. Trop.*, 24 (3) : 263-301.
- FELLER (C.), MILLEVILLE (P.), 1977 — *Évolution de sols de défriche récente dans la région des terres neuves (Sénégal oriental)*. I. Présentation de l'étude et de l'évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. Dakar, Orstom, 26 p.
- KOUDOKPON (V.), VERSTEEG (M.), 1991 — *Mucuna = solution pour les terres pauvres et les champs envahis par les chiendents*. Cotonou, IITA, 10 p. *multigr.*
- LAL (R.), 1976 — Soil erosion on alfisol in Western Nigeria. *Geoderma*, 16 : 363-431.
- MBAGWU (J. S. C.), 1985 — Subsoil productivity of an ultisol in Nigeria as affected by organic wastes and inorganic fertilizer amendments. *Soil Sci.*, 140 (6) : 436-441.
- PFEIFFER (V.), 1988 — *Agriculture au Sud-Bénin. Passé et perspectives*. 172 p.
- PIERI (C.), 1989 — *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, Cirad, 444 p.
- PURSEGLOVE (J.), 1968 — *Tropical crops. Dicotyledons 1 : 200*. London, Longmans, Green & Co.
- ROOSE (E.), 1973 — *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Milieu intertropical*. Thèse doct. ing., fac. Sci., Abidjan, 125 p.
- ROOSE (E.), 1976 — *Le problème de la conservation de l'eau et du sol en République du Bénin. Mise au point en 1976*. Abidjan, Orstom/FAO, 34 p.
- ROOSE (E.), 1994 — Une méthode traditionnelle de restauration des sols. Le zaï au pays Mossi (Burkina Faso). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- RUFYIKIRI (G.), HENNEBERT (P.), 1994 — Production de biomasse avec ou sans intrants lors de la première mise en culture de deux sols ferrallitiques au Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 14 : 100-114.
- SEDOGO (M.P.), 1981 — *Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride*. Thèse doct. ing., INPL, univ. Nancy, 195 p.
- SIBAND (P.), 1972 — Étude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. Principaux résultats. *Agron. Trop.*, 27 (5) : 574-590.

- VOLKOFF (B.), 1976 — *Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1 : 200 000. Feuille Abomey*. Paris, Orstom, Notices explicatives, 66 (2), 40 p., 1 carte h.t.
- VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1976 — *Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuille Porto-Novo*. Paris, Orstom, Notices explicatives, 66 (1), 39 p., 1 carte h.t.
- WALKLEY (A.), BLACK (I.), 1934 — An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37 : 29-38.
- WERTZ (R.), 1979 — *Dossier pour une synthèse des résultats de la recherche agronomique au Bénin en maïsiculture*. Cotonou, Cirad-Irat, 241 p., multigr.

**La gestion conservatoire de l'eau,
de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)**
The water and soil fertility management

Photo P. Ségalen



Au niveau du terroir villageois de Gulmi (Népal), l'effort de gestion de l'environnement porte à la fois sur la gestion des eaux de surface (haies vives, talus enherbés, terrasses progressives ou radicales), de la biomasse (élevage) et sur la production de fumier.

La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti

Cas du transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin dans le sud d'Haïti

Bernard SMOLIKOWSKI

Mission de coopération, CP 82, Praïa, République du Cap-Vert.

RÉSUMÉ

Face à la forte pression démographique et au milieu naturel à risques élevés, la petite exploitation familiale agricole (plus de 90 % des exploitations) tend à s'appauvrir toujours plus et a déjà largement entamé son capital « ressources naturelles ».

L'auteur présente un diagnostic des milieux physique et socio-économique, puis analyse comment les paysans haïtiens ont mis en place des stratégies adaptées aux situations complexes auxquelles ils sont confrontés : transferts de fertilité, utilisation d'intrants organiques et minéraux localisés et concentrés sur les cultures maraîchères, implantation de haies vives autour des jardins multiétagés à très forte production de biomasse. Cette adaptation ne signifie pas pour autant équilibre et certaines voies d'évolution sont même inquiétantes et peuvent aboutir à terme à des ruptures. Certains sols sont très dégradés et ne permettent déjà plus la reproduction de certains systèmes.

Devant cette situation et face aux échecs des méthodes d'équipement rural qui considèrent les problèmes de conservation des sols comme l'unique but technique à atteindre, l'auteur propose une démarche qui s'appuie sur une logique de développement rural, la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Cette démarche a été appliquée dans le cadre de deux projets de recherche-développement dans le sud du pays.

Après avoir défini les principes d'intervention, l'auteur montre comment s'est organisé l'aménagement de l'espace avec la participation des communautés rurales. Il expose les actions entreprises et certaines des techniques utilisées pour améliorer la production tout en restaurant le milieu. Il met en évidence comment les choix techniques sont étroitement liés au diagnostic préalable et doivent répondre aux besoins des paysans.

MOTS CLÉS : Haïti — Stratégies paysannes — Lutte antiérosive — Conservation de l'eau — Fertilité des sols — Biomasse — Agroforesterie — GCES.

ABSTRACT

THE WATER AND SOIL FERTILITY MANAGEMENT (GCES): A NEW STRATEGY FOR FIGHTING EROSION IN HAÏTI

Haitian small family farms, making up more than 90 % of all landholdings, are suffering decreasing harvests and increasing poverty. A high and rising population pressure linked with a high risk natural environment, is causing an erosion of the natural resource base.

Presented here is a diagnosis of the physical and socio-economic environment encountered by the small farmers, including agro-ecology, erosion processes, land-use systems, social and economic factors. How Haitian farmers then adapt their land-use strategies to face their complex situations is then analysed, in terms of fertility transfers, use of mineral and organic fertilisers concentrating on crop production, use of fallow. Such adaptations do not necessarily lead to an ecological equilibrium, and all uncertain lines of the system evolution run the risk of eventual breakdown.

Facing the failure of mechanical approaches to soil conservation, which consider the resolution of such problems as an isolated technical aim, here an alternate approach is proposed, based on a rationale for rural development with careful management of water and soil fertility (GCES). This approach has been put into practice by two research and development projects in the south of Haïti.

Described here are the base lines of project intervention, how the management has been organised with the participation of the rural communities, and the techniques employed for improving production and maintaining the natural environment. Also displayed are how the technical decisions are directly linked to the original diagnosis, and how these decisions must answer to the needs of the rural communities.

KEYWORDS : Haïti — Farmers strategies — Erosion control — Water conservation — Soil fertility — Biomass — Agro-forestry — GCES.

RESUMEN

LA GESTION CONSERVATORIA DEL AGUA, DE LA BIOMASA Y DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS : UNA ESTRATEGIA POSITIVA POR UN NUEVO MODO DE LUCHA CONTRA LA EROSIÓN

Debido a la fuerte presión demográfica y un medio ambiente con elevados riesgos, la pequeña explotación familiar agrícola (más del 90 % del total) tiende a empobrecerse siempre más y ha consumido ya buena parte de su capital en « recursos naturales ».

Los autores presentan un diagnóstico de los medios físicos y socio-económicos, y luego analizan como los campesinos haitianos han elaborado estrategias adaptadas a las situaciones complejas a las cuales se hallan confrontados : traslado de fertilidad, utilización de abonos orgánicos y minerales localizados y concentrados en los cultivos de hortalizas, implantación de setos vivos alrededor de jardines multi-escalonados con alta producción alta de biomasa. Esta adaptación no significa sin embargo equilibrio. Algunas vías de evolución llegan incluso a ser preocupantes y pueden conducir a breve plazo a rupturas. Ciertos suelos están degradados y ya no permiten la reproducción de ciertos sistemas.

Ante esta situación y frente a los fracasos de los métodos de equipamientos rurales que están considerando los problemas de conservación de los suelos como el único objetivo técnico por alcanzar, los autores proponen un método que se apoya sobre una lógica de desarrollo rural, la gestión conservatoria del agua, de la biomasa y de la fertilidad de los suelos (GCES).

Este dicho método fue aplicado en el ámbito de los proyectos de investigación/desarrollo en el sur del país. Tras de haber definido los principios de intervención, los autores muestran como ha organizado la ordenación del espacio con la participación de las comunidades rurales. Revelan las acciones realizadas y algunas de las técnicas utilizadas para mejorar la producción mientras se restauraba el medio ambiente. Evidencian como las elecciones técnicas están estrechamente ligadas al diagnóstico previo y que deben responder a las necesidades de los campesinos.

PALABRAS CLAVES : Haïti — Lucha contra la erosión — Conservación del agua — Fertilidad de los suelos — Biomasa — Agroforestería — GCES.

INTRODUCTION

Les méthodes de lutte antiérosive et de conservation des sols dites « modernes » (DRS, CES, RTM), appliquées depuis une cinquantaine d'années en Haïti par les instances étatiques et les projets d'aménagement, n'ont donné que des résultats mitigés et discutables. En effet, la protection des versants n'a pas été accueillie avec beaucoup d'intérêt par les paysans (excepté dans le cas où des salaires ont été distribués) puisqu'elle ne permettait pas l'amélioration rapide des revenus et des rendements.

Dans un contexte d'agriculture en crise et afin de faire face à un milieu naturel à risques élevés, les paysans haïtiens ont adopté des stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive et d'amélioration de la fertilité des sols leur per-

mettant de survivre. La richesse de leurs choix renseigne l'observateur sur leur degré d'adaptation. Adaptation ne signifie pas pour autant équilibre, et certaines voies d'évolution sont inquiétantes et risquent d'aboutir à terme à des ruptures.

Une autre stratégie s'appuyant sur une logique de développement rural, la gestion conservatoire des eaux, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), a permis de mettre en place des techniques adaptées au contexte haïtien dans le sud du pays : il s'agit du transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin (représentatif de la région sud du pays) où sont intervenus deux projets de la Coopération française, Salagnac-Aquin (1978-1992) et Pratic (1) (1988-1992), afin d'y étudier les moyens d'intensifier la production agricole tout en stabilisant les versants (fig. 1).

(1) Projet de recherche appliquée à l'aménagement intégré des terroirs insulaires caraïbes.

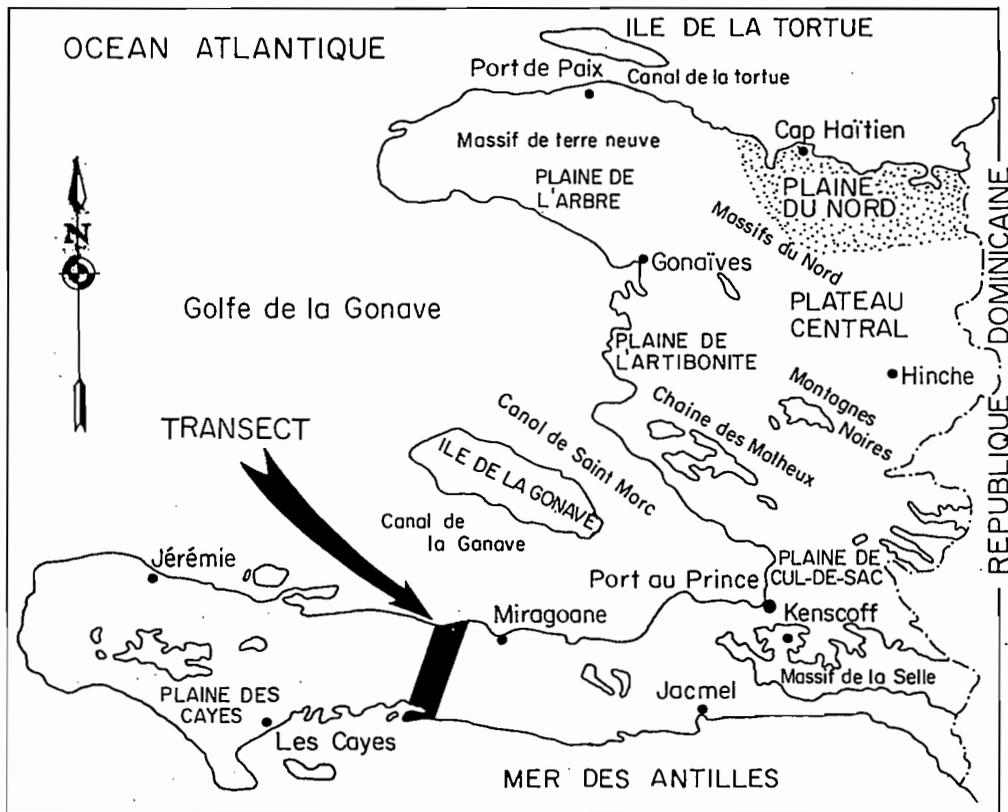


FIG. 1. — Carte d'Haïti.
Map of Haïti.

PROBLÉMATIQUE

Un contexte particulier : une agriculture en crise et un milieu naturel à risques élevés

Depuis les années 1950, Haïti subit une dégradation accélérée de son espace rural et de ses ressources naturelles. Mais, bien que son agriculture traverse une crise particulièrement difficile, elle représente toujours l'un des moteurs de son économie.

La malnutrition dans les campagnes, la baisse des exportations (50 % ces dix dernières années), l'exode rural important et l'incapacité des familles à épargner plongent le paysan haïtien dans un cycle de décapitalisation dont il aura du mal à se sortir, les revenus agricoles très faibles (ils sont passés de 450 à 250 dollars US en 1992) ne permettant même plus à la majorité d'entre eux de renouveler leur capital animal et leur capital outil.

De plus, la démographie élevée accentue la pression foncière. Ainsi, la mise en culture de plus en plus rapprochée diminue les temps de jachère, provoque le surpâturage et favorise la dégradation des sols. Celle-ci ne s'exprime pas seulement par une baisse de la fertilité mais aussi par une accélération des pertes en sol, les facteurs du milieu physique étant naturellement fragiles : 60 % des

terres cultivées sont situées en montagne sur des pentes très fortes (de 20 à 80 %) et le régime des pluies souvent violentes favorise le ruissellement. Le corollaire de tous ces facteurs est une baisse de la productivité du travail devant laquelle la production de charbon de bois apparaît comme une alternative pour l'amélioration des revenus agricoles. Cette production provoque un déboisement anarchique qui accélère la détérioration des ressources naturelles, véritable support des exploitations agricoles (fig. 2).

Cette décapitalisation ainsi provoquée s'accompagne d'une perte de la cohésion sociale et oblige le paysan haïtien à adopter une attitude de survie, ce qui rend plus difficile la gestion collective de l'espace (contrôle des parcours du bétail, de la coupe des ligneux), nécessaire à la réussite des actions d'aménagement et de lutte antiérosive.

Les solutions dites « modernes » et leur échec

Depuis les années 1960 jusqu'en 1990, les instances étatiques, conseillées par les organismes internationaux et les bailleurs de fonds, ont cru voir dans la résolution des problèmes liés à la conservation des ressources naturelles la solution à la crise du secteur rural. Le contexte particulier d'Haïti a favorisé la mise en œuvre de nombreux

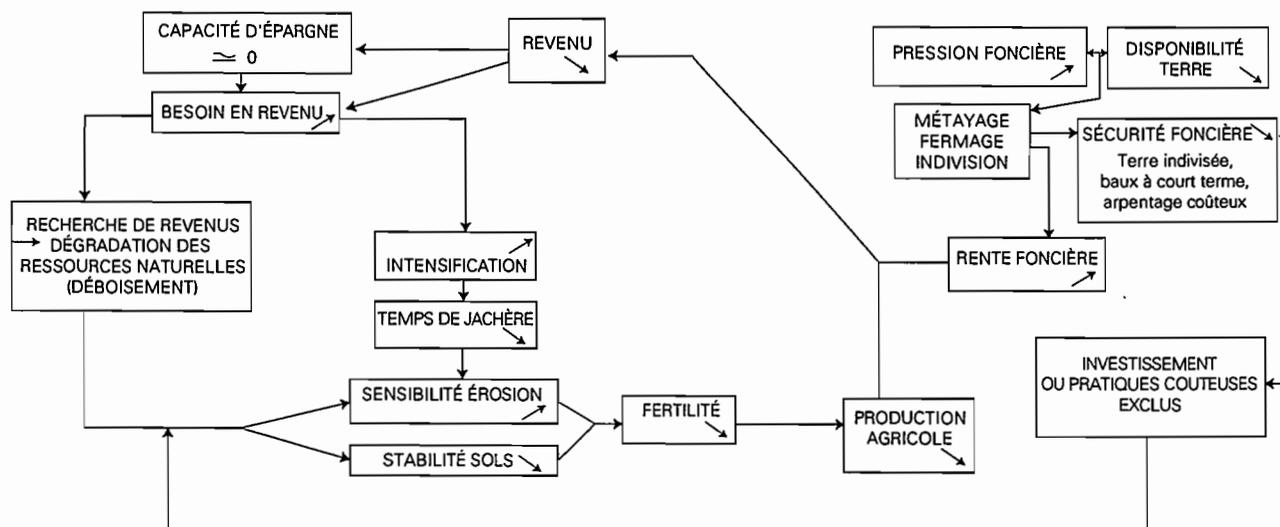


FIG. 2. — Schéma explicatif du processus de décapitalisation de l'exploitation familiale.
Scheme of the decapitalization process of small farm holding.

actions et projets s'appuyant sur une stratégie « moderne » d'équipement rural et a, ainsi, largement contribué à faire de ce pays un « laboratoire de la lutte antiérosive ».

Malheureusement, cette conception de l'aménagement de l'espace se résumait le plus souvent à des actions de « mise en défens » (DRS) ou de conservation de l'eau et des sols (CES), faisant de la lutte antiérosive une discipline isolée. Les actions n'ont donné que des résultats mitigés et discutables et se sont souvent soldées par un échec.

En effet, la stratégie utilisée consistait à donner la priorité à l'aménagement d'un espace dont l'unité était le bassin versant, en privilégiant la cohérence physique des processus. Elle accordait la priorité à des équipements structurants (routes, pistes rurales, correction de ravines, canaux de contour, murs secs en pierres, terrasses radicales) dont la plupart ont été réalisés avec l'aide des populations concernées, en contrepartie d'une rémunération (en argent ou en vivres). Ils devaient avoir rapidement des effets sur la conservation des ressources naturelles.

LES TECHNIQUES UTILISÉES

Les canaux de contour

Ils ont été construits dans plusieurs régions du pays. Ils permettent une meilleure infiltration et une diversion des eaux de pluie qui se concentrent dans les canaux (1 m de largeur et 60 cm de profondeur) creusés suivant les courbes de niveau avec une légère pente (1 %), jusqu'à un exutoire. Ce type d'ouvrage présente de nombreux inconvénients :

— il nécessite beaucoup de travail pour sa construction, et son entretien doit être fait régulièrement (curage, réparation du talus) ;

— cette technique est particulièrement fragile et transforme souvent l'érosion diffuse en érosion linéaire lorsque les ouvrages sont mal conçus ou mal entretenus ;

— la surface utilisée, peu productive, est perdue pour les cultures ; la structure n'améliore ni la fertilité des sols, ni les rendements ; elle ne motive pas les paysans pour son entretien et seuls les salaires versés peuvent les inciter à réaliser ce type d'aménagement ;

— son coût est élevé.

Les murs secs

Il s'agit d'ouvrages réalisés avec des pierres disposées comme un mur de maçonnerie, de 0,80 m à 1 m de hauteur. Cette technique est laborieuse, peu productive et nécessite également beaucoup de précautions et d'entretien (les murs sont souvent détruits par le passage des animaux). Elle dénude le terrain de ses pierres, ce qui provoque parfois une accélération du décapage par ruissellement. La fertilité des sols n'est pas améliorée et le paysan ne peut être motivé que par le versement d'un salaire.

Les terrasses radicales

Elles ont été essayées sans beaucoup de succès. Elles sont extrêmement coûteuses et nécessitent des moyens démesurés (tracteur ou bulldozer), et leur construction perturbe complètement les horizons de surface et de profondeur. Elles détériorent la fertilité des sols pour de nombreuses années.

Les seuils dans le traitement des ravines

Ils ont été généralement les plus grands succès de ce type de projet sur le plan technique. Mais le recours à une main-d'œuvre salariée importante est obligatoire.

LES CAUSES DE L'ÉCHEC

Cet échec s'explique essentiellement par le fait que « l'intérêt général » joue un rôle central. Il légitime l'aménagement et fait de la conservation des sols (CES) l'objectif prioritaire, excepté pour le paysan haïtien. En effet, ce dernier perçoit le projet comme un moyen de bénéficier d'un revenu immédiat, à défaut d'offrir une perspective d'amélioration à court terme des rendements et du revenu agricole par l'utilisation des techniques de conservation proposées.

Il n'existe d'ailleurs aucune relation directe entre ces techniques et l'ensemble des contraintes auxquelles font face les paysans. Cette inadéquation entre propositions et contraintes résulte d'une méconnaissance profonde des rationalités économiques paysannes, du fonctionnement des systèmes d'exploitation agricole en général et des problèmes fonciers en particulier.

En effet, ceux-ci se caractérisent par un système d'héritage qui favorise le morcellement des propriétés et l'indivision, augmente l'insécurité foncière et le risque vivrier par la diminution des surfaces en culture. Or, la mise en place des ouvrages nécessite de sacrifier une certaine portion de la surface cultivable, déjà restreinte, sans possibilité d'amélioration des rendements avant de nombreuses années. Ils exigent un surcroît de travail pour leur entretien, travail qui ne peut être assuré que par le paysan lui-même. De plus, ces techniques ne réduisent pas la dégradation des terres entre les ouvrages et n'améliorent pas leur productivité. Elles sont peu efficaces et augmentent parfois les risques (débordement, ravinement, glissement) en déséquilibrant le versant. Aussi, pour éviter de tels problèmes, ces aménagements sont-ils souvent réalisés sur des terres marginalisées par les agriculteurs.

De même, les recherches entreprises se préoccupent plus de la sélection des espèces et de la profondeur ou de l'inclinaison des terrasses que des modes d'intégration de l'arbre ou de la structure mécanique aux systèmes d'agriculture traditionnels.

Enfin, le type d'organisation des projets devrait être remanié : population utilisée comme réservoir de main-d'œuvre sans réelle participation de celle-ci, manque de suivi et d'évaluation des actions engagées.

Il existe donc une incohérence totale entre les objectifs d'un projet privilégiant la logique d'équipement et les objectifs des populations concernées (rarement concertées). La situation est telle qu'il n'est plus temps de défendre (DRS) ni même de conserver (CES) les sols. En effet, la population augmentant rapidement, il faut nécessairement améliorer la production sans dégrader l'environnement.

Une nouvelle approche participative : les projets Salagnac/Aquin et Pratic

Depuis 1985, une autre approche, s'appuyant sur une logique de développement rural, se met en place. Elle vise principalement à résoudre les problèmes immédiats des populations (sécurité alimentaire, amélioration des revenus, valorisation du travail) à travers une meilleure gestion de leur espace, en utilisant des techniques adaptées au contexte haïtien tout en sauvegardant l'environnement et le capital foncier. La conservation des sols et de l'eau n'est plus un but en soi mais devient un des moyens d'établir des systèmes de production stables.

Cette approche, également appelée gestion conservatoire des eaux, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), se propose d'améliorer l'infiltration au champ afin d'augmenter la production de biomasse (donc les rendements) en couvrant mieux le sol, et de rétablir l'équilibre des bilans des matières organiques et minérales du sol. Par conséquent, elle cherche à réduire les effets de l'érosion et des transports solides en modifiant les systèmes de production, tout en responsabilisant les paysans face à leur environnement.

Elle a été appliquée, avec quelques variantes, par deux projets de la Coopération française, Salagnac-Aquin (1978-1992) et Pratic (1988-1992), dont les interventions (2) sur le transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin (cf. fig. 1) visent à favoriser l'intensification et la diversification des productions agricoles tout en stabilisant les versants : nouvelles cultures de rente ; augmentation des rendements des cultures vivrières sur les espaces présentant de bonnes potentialités, afin de libérer les zones les plus fragiles de la pression culturale (travail du sol fréquent et surpâturage) et de les reconverter en zone d'arboriculture fruitière et forestière ; amélioration des conditions de l'élevage, etc.

Cette stratégie s'est appuyée sur les principes suivants :

— permettre dès la conception du projet une participation paysanne : c'est un élément déterminant de l'orientation des actions de protection et une condition *sine qua non* pour assurer le succès du projet, les paysans étant les seuls capables d'assurer l'entretien des aménagements à l'échelle de la parcelle et (ou) du versant ;

— renforcer les méthodes traditionnelles de conservation de l'eau et des sols : les paysans haïtiens ont d'ailleurs eux-mêmes adopté des stratégies traditionnelles de lutte antiérosive et d'amélioration de la fertilité des sols leur permettant de survivre ;

— choisir en priorité des zones qui ont conservé un maximum de potentialités en matière de production agricole ;

(2) Ces interventions ont été brutalement interrompues à la suite de la suspension de la coopération, décision survenue après le coup d'État de septembre 1991.

— intervenir au niveau de la parcelle et du versant, puis, à chaque fois que cela s'avère possible, à l'échelle du bassin versant ; l'aménagement est donc pensé à l'échelle de la parcelle, puis de l'exploitation et enfin du terroir, la conception d'une opération d'aménagement « à la parcelle » n'étant pas une alternative à une opération d'aménagement au niveau d'un bassin versant ; ces niveaux ne relèvent pas de la même stratégie d'intervention (logique de développement rural et logique d'équipement doivent au contraire être complémentaires) ;

— accompagner les actions de conservation des sols par des actions convergentes permettant l'amélioration des systèmes de production (intensification et diversification des systèmes de culture, amélioration des systèmes d'élevage, création d'opérations d'épargne et de crédit) ;

— mettre en place un mode de relation contractuel permettant de définir avec précision les conditions de l'intervention et les relations projet-paysans ; il faut en effet bien définir les actions qui relèvent de la responsabilité stricte de chaque paysan (aménagement à la parcelle), celles à la charge des communautés rurales (routes, pistes rurales, citernes communautaires, correction de ravines), et enfin les engagements du projet ;

— permettre une action de programmation, de suivi et d'évaluation (mesure des effets).

Ce type d'opération, pour modifier sensiblement les systèmes de production et infléchir les pratiques, tout en responsabilisant les paysans face à la gestion de leur environnement, nécessite beaucoup de temps (huit à dix ans).

Trois phases sont nécessaires :

— première phase : réalisation d'un diagnostic du milieu de façon à connaître les potentialités et contraintes du milieu physique, les processus de dégradation des sols (où, quand et comment se manifestent-ils ?) mais aussi les stratégies paysannes en matière de fonctionnement des exploitations et de techniques de gestion de l'eau et de la fertilité ; ce diagnostic permet le dialogue avec les communautés et la mise en confiance ;

— deuxième phase : expérimentations en milieu réel pour établir un référentiel technique (comparaison des techniques traditionnelles avec les techniques proposées) ;

— troisième phase : évaluation des résultats par les communautés et les techniciens, puis planification des aménagements à l'échelle du versant et du bassin versant.

DIAGNOSTIC DE LA SITUATION AU SUD D'HAÏTI : UNE GRANDE DIVERSITÉ

Diversité des milieux naturels

Elle résulte de l'interaction de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature des matériaux, les bioclimats, la topographie.

L'étude des éléments du climat exprime des situations climatiques variées au sein du transect et qui dépendent en particulier de l'altitude. On observe des différences significatives au plan :

— des températures moyennes mensuelles entre les « terres froides » (21 à 24 °C) des étages supérieurs (700 à 900 m) et les « terres chaudes » (25 à 28 °C) situées plus bas (100 à 300 m) ;

— de l'exposition au vent suivant que l'on se situe sur les plateaux dénudés, les versants sud ou nord ou les bas-fonds ;

— de la pluviométrie qui varie considérablement avec l'altitude : elle est maximale (1 200 à 2 200 mm) au niveau de Salagnac (900 m) et minimale en bordure de mer, avec des variations selon que l'on se trouve sur le versant nord (1 200 à 1 500 mm) ou au sud (600 à 900 mm).

Le fait remarquable est le caractère très discontinu des précipitations qui tombent, en général, sous forme de « grains » assez courts (à l'exception des pluies cycloniques). L'intensité est souvent très forte, de l'ordre de 10 à 100 mm par heure. Le tableau I montre l'importance relative des fortes pluies (supérieures à 50 mm par jour) par rapport au total annuel des précipitations, pour certaines stations du transect. Ces fortes pluies ont une capacité érosive élevée et sont souvent à l'origine des crues brutales et importantes qui envahissent les ravines torrentielles. Seuls les mornes d'altitude connaissent, outre des événements pluviométriques à forte intensité, des pluies fines associées à de fortes nébulosités qui peuvent parfois durer plusieurs jours.

TABLEAU I
Importance relative des fortes pluies (supérieures à 50 mm par jour) par rapport au total annuel des précipitations (source : projet Salagnac, 1991)
Relative importance of heavy rains (superior of 50 mm per day) in relation to the annual total rainfalls

STATIONS	Salagnac (900 m)	Pogy (500 m)	Petite rivière Nippes (150 m)
Nombre de jours de pluie > 50 mm	6	10	3
Total des précipitations > à 50 mm	365	615	231
% annuel des précipitations > 50 mm	19	34	18

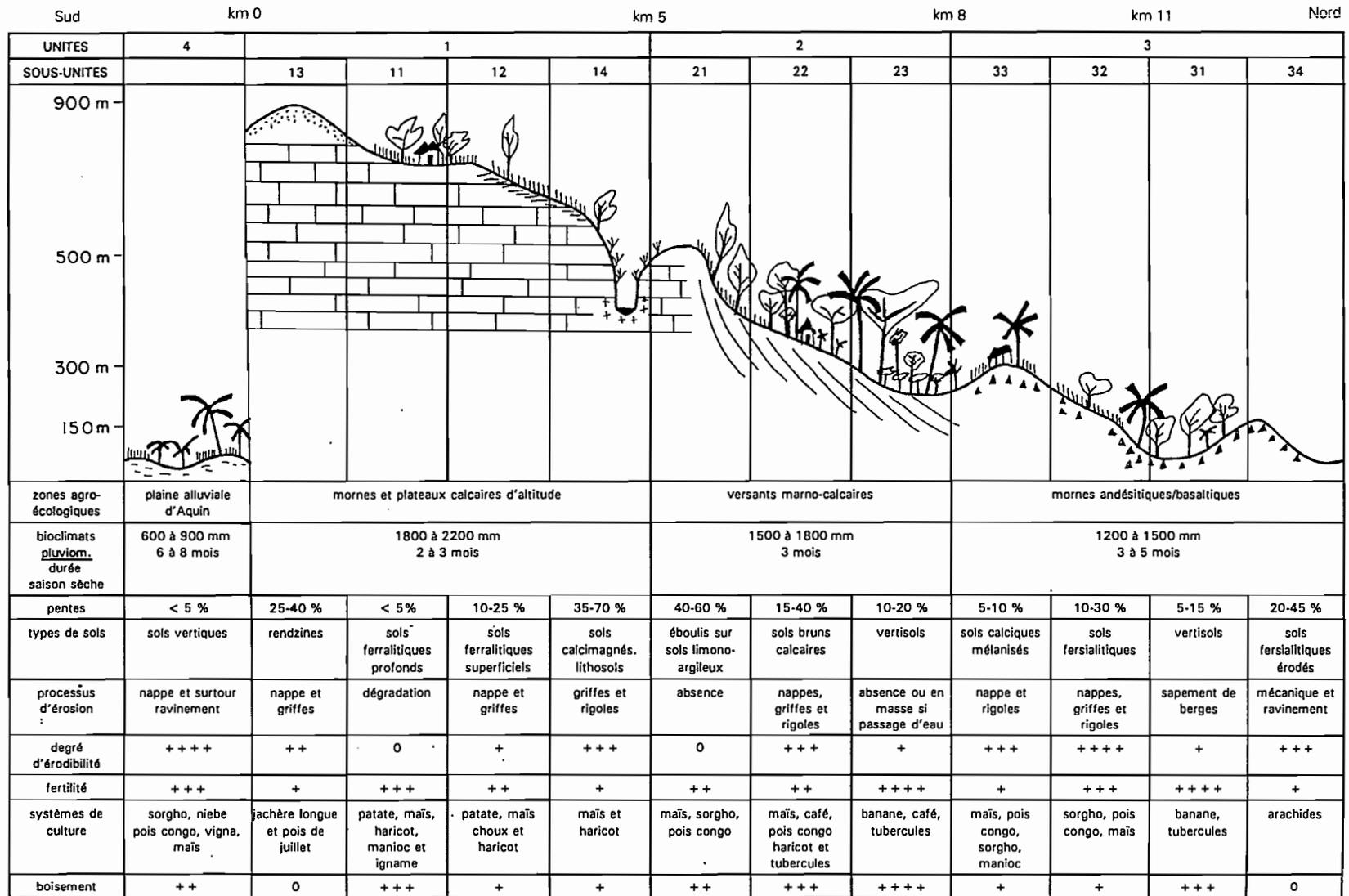


FIG. 3. — Coupe agroécologique schématique du transect (d'après GUARRIGUE et SMOLIKOWSKI, 1991).
 Agro-ecological cross section of the target area (after GUARRIGUE and SMOLIKOWSKI, 1991).

L'étude de la nature des matériaux, de leur distribution et des nuances introduites par la géodynamique externe ainsi que des différents bioclimats a permis d'identifier sur le transect quatre grandes unités agroécologiques et leurs sous-unités (fig. 3). Ces sous-unités sont fondamentales dans l'explication et la compréhension des choix que font les agriculteurs quant à la répartition spatiale des cultures et l'utilisation des sols sur chaque parcelle. Elles se caractérisent essentiellement par des remaniements des sols témoins au niveau des toposéquences (morphopédologie) et des degrés d'érosion divers.

UNITÉ 1 : MORNES ET PLATEAUX CALCAIRES D'ALTITUDE

Ils s'étendent de 500 à 900 m et sont représentés par des sols ferrallitiques minéralement très pauvres vers le haut et des sols calcimagnésiques vers le bas où prédominent la kaolinite ou l'halloysite. La pierrosité est importante. La fertilité organique y est faible alors qu'elle reste le principal constituant capable d'assurer le stockage et l'échange des cations, la capacité d'échange cationique (CEC) de la fraction minérale étant partout faible à nulle (fig. 4). La CEC totale est parfois si faible que les bases échangeables sont très peu abondantes, en particulier le magnésium et le potassium. La fertilité chimique faible est particulièrement dépendante de la gestion de la matière organique.

Les précipitations fréquentes et parfois intenses (60 à 80 mm/h) représentent le principal atout (1 800 à 2 200 mm par an) de cette unité, encore que des différences importantes de réserve utile apparaissent en fonction de la profondeur des sols : c'est une des raisons pour lesquelles les jardins arborés entourant les maisons sont principalement situés sur les sols profonds.

Les vents peuvent être violents et présenter des contraintes supplémentaires pour les cultures dont l'association de base est constituée de maïs-haricot-patate douce, parfois renforcée par le chou pommé et l'igname. C'est la zone la plus déboisée du transect, à l'exception des zones densément peuplées grâce à la présence du jardin entourant la maison d'habitation qui est toujours en propriété : le jardin « devant-porte-kaye » encore appelé « lakou ».

Cette unité est caractérisée par les sous-unités suivantes :

— les plateaux (plateaux) d'accumulation (fig. 3, sous-unité 11) à sols rouges ferrallitiques bauxitiques profonds (> 50 cm), bien drainants et peu sensibles à l'érosion, sont appelés « terre franche ». Ce sont souvent les sols des « lakou ». Ils sont bien pourvus en matière organique et la réserve en eau est raisonnable. La capacité d'infiltration est très bonne (20 à 40 mm/h). La structure en microagrégats stables ne présente pas ou peu de particules détachables ;

— les sols rouges ferrallitiques superficiels sur pente (10 à 25 %), appelés « terre mêlée » (sous-unité 12), sont également peu sensibles à l'érosion. Ils sont moins épais que les précédents : la réserve utile est plus faible. L'infil-

tration est bonne (15 à 30 mm/h) et la teneur en matière organique est moindre ;

— les rendzines, appelées « terre sableuse » (sous-unité 13), sont très superficielles, perméables, très pauvres en matière organique et sensibles à l'érosion en nappe. Elles correspondent à l'affleurement du calcaire. Stade d'érosion extrême, elles sont très pauvres en matière organique et en nutriments et ne portent que de maigres cultures de haricot ;

— les versants de ravine à sols superficiels (sous-unité 14) pierreux et lithosols ou sols calcimagnésiques, fortement érodés sur pente très forte (35 à 70 %), sont impropres à la culture sur les très fortes pentes.

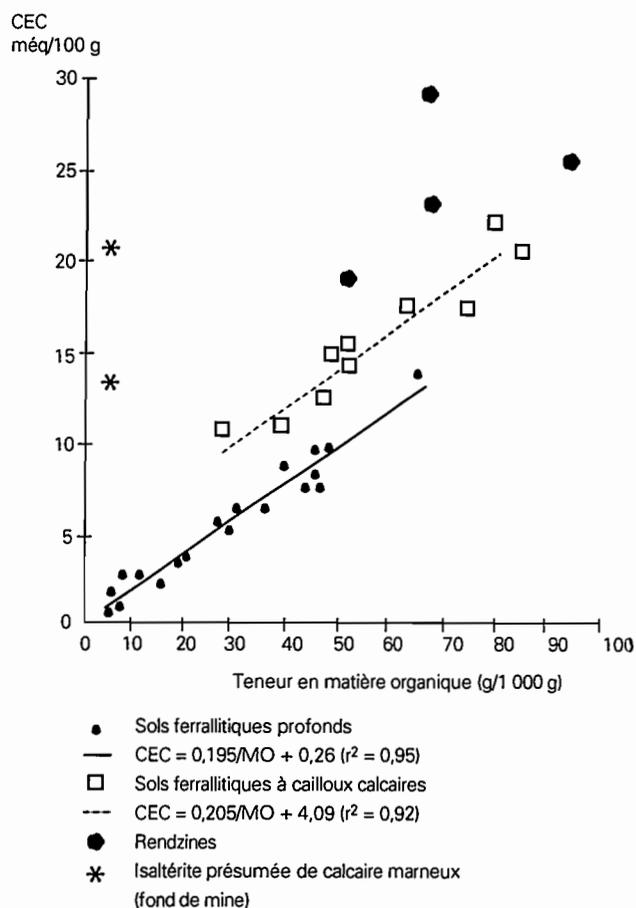


FIG. 4. — Effet du taux de matière organique sur la capacité d'échange dans les sols ferrallitiques de l'unité 1 (d'après CABIDOCHÉ, 1989).

Effect of the organic matter on the exchange capacity in the ferrallitic soil of the unit 1 (after CABIDOCHÉ, 1989).

UNITÉ 2 : VERSANTS ET BAS-FONDS MARNO-CALCAIRES

C'est une zone d'émergence de sources. Elle est caractérisée par des versants raides et réguliers. Les sols, riches en smectite, sont plus favorables aux cultures pérennes

(vertisols, sols bruns calcaires). Ils sont en général moyennement profonds. L'érosion ne met pas à nu la roche proprement dite mais son altérite capable de reformer rapidement un sol. Cette érosion est malgré tout suffisamment régulière pour que l'on observe des sols évolués uniquement sur les replats. Ils sont dans l'ensemble bien pourvus en Ca, Mg, P et K et présentent une CEC élevée.

Les précipitations assez importantes (1 500 à 1 800 mm) permettent deux saisons de culture avec l'igname, le maïs, le sorgho et le haricot noir principalement. Les bananes, le café et le malanga (*Xanthosoma* spp.) se rencontrent dans les endroits plus frais (ravines, bas-fonds). Le boisement est très important, avec une dominance de l'arbre véritable, plus vulgairement appelé l'arbre à pain (*Artocarpus incisa* var. *non semifera*).

Cette unité se distingue par les sous-unités suivantes :

— les éboulis calcaires sur pente très forte (sous-unité 21) (60 %) sont faiblement cultivés bien que les sols présentent une bonne réserve utile grâce aux écoulements latéraux et une bonne CEC ;

— les sols bruns calcaires sur pentes assez raides (sous-unité 22) sont bien cultivés — maïs, haricot noir, pois congo (*Cajanus cajan*), sorgho — maïs sont sensibles à l'érosion en nappe ou en rigole, parfois en griffe ;

— les bas-fonds et ravines très boisés à vertisols profonds et argileux (sous-unité 23) sont riches en matière organique. La réserve utile et la CEC sont très élevées et permettent la plantation de bananiers, de tubercules et d'arbres véritables.

UNITÉ 3 : LES MORNES BASALTIQUES

Cette unité agroécologique est moins bien arrosée (1 200 mm/an) et ne dépasse pas 300 m d'altitude. La saison sèche est marquée (trois à cinq mois) et ne permet qu'une saison de culture : sorgho, arachide, pois congo et parfois maïs.

Les sols à smectite et tactoïdes instables d'origine volcanique présentent de bonnes aptitudes agronomiques. Il s'agit d'ensembles de sols dont la logique de distribution est liée à la toposéquence. Partout s'est développée une érosion anthropique accélérée catastrophique qui renforce la dégradation de ces sols déjà soumis naturellement à une érosion importante. Souvent pentus, ils sont soumis à une forte érosion de surface par ruissellement diffus ou à une érosion en griffe et rigole.

Les sous-unités identifiées sont :

— les bas-fonds avec des vertisols sur colluvions (sous-unité 31) à bonne réserve en eau mais avec des risques d'hydromorphie temporaire ; on y cultive des bananiers, des tubercules et des arbres ; l'érosion se fait par sapement des berges ;

— les versants secs sur sols fersialitiques (sous-unité 32) cultivés en maïs, sorgho et pois congo ; le taux de matière organique est assez bon ; l'infiltration est prati-

quement nulle sur les fortes pentes et le ruissellement diffus favorise une érosion de surface en nappe ;

— les sommets d'interfluve sur sols calciques mélanisés (sous-unité 33), qui présentent une réserve utile faible et une bonne CEC ;

— la roche mère affleurante (« terre finie ») sur sols andésitiques très érodés (sous-unité 34), où est cultivée l'arachide. Les glissements de terrain par solifluxion et le ravinement marquent cette unité.

UNITÉ 4 : LA PLAINE D'AQUIN

Elle est située entre le niveau de la mer et 300 m d'altitude. Elle se caractérise par un climat tropical sec où la pluviométrie annuelle est comprise entre 600 et 1 000 mm, avec de grandes variations interannuelles et une saison sèche de six à huit mois. Les sols sont vertiques et peu filtrants sur pentes faibles (3 à 10 %). Les systèmes de culture sont centrés sur diverses associations : maïs, niébé, sorgho, pois congo, vigna. Le ravinement fréquent est provoqué par des espaces de concentration de l'eau des pluies (routes, chemins).

Diversité des systèmes de production

Plusieurs facteurs expliquent cette diversité :

— une pression sur le foncier inégale suivant les zones, qui conditionne certains choix ou certaines pratiques ;

— des modes de tenure complexes dont les quatre plus importants sont, par ordre de sécurité décroissante, la propriété, la terre héritée formellement divisée, la terre héritée informellement divisée, la terre héritée indivise, auxquels il faut ajouter les modes de faire-valoir : le faire-valoir direct (le plus courant), le fermage (60 à 120 dollars par hectare et par an) et le métayage (part d'un tiers à un demi versée au propriétaire), système adopté par les plus démunis ;

— la main-d'œuvre disponible, vendue ou achetée ;

— la disponibilité en capital bétail.

Ces facteurs endogènes déterminent trois grandes classes de systèmes d'exploitation qui se caractérisent par des niveaux socio-économiques hétérogènes.

Le niveau socio-économique est considéré comme faible lorsque les paysans ont très peu de terre en propriété (moins d'un hectare) mais plutôt en métayage, de très faibles ressources de trésorerie, et une épargne sur pied (animaux) réduite. Ils sont obligés le plus souvent de vendre leur force de travail pour améliorer leur revenu. Pour certains, c'est une phase de démarrage de l'exploitation, pour d'autres c'est un état permanent dont la cause principale est la rente foncière qui empêche tout processus d'accumulation.

Il est moyen lorsque la SAU (entre 1 et 3 ha) suffit pour alimenter toute la famille, le chef d'exploitation étant donc moins dépendant des paysans aisés et du marché, mais aussi moins intégré à celui-ci. L'accumulation est basée sur la production agricole. Elle peut être ralentie par l'agrandissement de la famille. L'exploitation oscille entre les deux niveaux extrêmes avec un équilibre dynamique.

Enfin, le niveau socio-économique est élevé si la SAU (plus de 3 ha) permet une production supérieure aux besoins de la famille. Le cheptel a atteint une taille suffisante pour servir d'épargne productive. En général, les processus d'accumulation ont pour origine un héritage important et (ou) une double activité (menuiserie, maçonnerie...). Ces exploitations drainent une main-d'œuvre importante et augmentent leur capital rapidement.

Cette hétérogénéité dans les systèmes d'exploitation agricole permet d'expliquer les différents modes de gestion des ressources naturelles et leur niveau de dégradation : ainsi, les stratégies de maintien de la fertilité seront différentes ; les charges à l'hectare en bétail, sur des exploitations présentant peu de surface, favoriseront le tassement puis le ruissellement et l'érosion ; enfin, la mise en culture des terres à faible sécurité foncière n'encourage pas à l'investissement maximal en travail, ni à la protection de l'espace cultivé. Il est à noter que les terres en indivision présentent des stades de dégradation avancés : tassements très importants, roche mère affleurante, absence d'arbres, fertilité très faible.

Diversité des processus de dégradation

La grande diversité dans les facteurs précédemment cités (milieu agroécologique et système d'exploitation) explique également la diversité des processus de dégradation de la couverture pédologique. Cette dégradation s'effectue en trois temps :

- minéralisation continue et rapide des matières organiques non compensée après le défrichement (peu ou pas d'enfouissement de matière organique) et accélérée par l'érosion diffuse (sélective) ;

- glissement progressif des couches superficielles par un travail répété du sol sous les cultures vivrières occupant très temporairement le sol (sur pente, le travail du sol est toujours réalisé du haut vers le bas) ;

- développement du ruissellement et du ravinement à la suite du tassement du sol par le bétail au piquet et sur les chemins, et surtout du fait de la diminution de la capacité de stockage de l'eau dans les sols décapés par l'érosion mécanique sèche (anthropique). Dans les zones de substrats calcaires, la pluie d'imbibition est de 70 à 80 mm sur les sols profonds ferrallitiques et de moins de 30 mm sur les « terres finies » ou les rendzines. Or des pluies supérieures à 60-80 mm/h surviennent chaque année (trois à six) ainsi que des cyclones (un tous les quatre à dix ans), avec des pluies de 400 mm en cinq jours.

L'érosion en nappe ne semble pas très importante dans l'unité 1 : on observe rarement de véritables croûtes de battance mais souvent le rejet d'agrégats, la fonte des buttes et le tassement de la surface du sol. Les sols argileux, bien structurés, calciques et caillouteux sont très résistants : le splash dégage des agrégats.

L'érosion linéaire est partout présente sous forme de griffes (unité 1) (canaux de quelques centimètres) et rigoles (décimètres) évoluant rapidement en ravines actives (mètres) (unités 2, 3 et 4) si on n'intervient pas. En effet, les terres où la roche mère affleure (« terre finie »), les chemins et les pistes, les jachères surpâturées et les sols vertiques sur basaltes sont à l'origine du ruissellement dangereux sur les fortes pentes. Les sols bruns sur basalte, imperméables, ruissellent énormément ($P_i = 2$ à 5 mm en humide).

L'érosion en masse s'effectue lentement par creeping et érosion mécanique sèche (travail du sol) sur les fortes pentes, et par érosion régressive sur les pentes convexes à partir du réseau de ravines (unité 3 surtout).

L'érosion de berge est très active dans les plaines où les rivières surchargées de sédiments (unité 4) changent fréquemment de lit.

D'une façon générale, l'érosion anthropique accélérée a dévasté certaines zones en décapant complètement le sol jusqu'à des altérites ou des roches impénétrables. Cependant, le risque et le degré d'érosion ne sont pas les mêmes sur les différentes unités. Les conditions climatiques ne sont pas la cause de cette différenciation car on rencontre partout des précipitations suffisamment durables pour que s'installent des ruissellements. Plus la pente est forte et longue, plus le risque d'érosion sera important. Mais l'importance de l'érosion diffère suivant les différents types de sols ou, plus précisément, suivant la taille des particules terreuses détachables. La figure 5 montre comment se distribuent les sols du transect ainsi que les risques d'érosion, ou plus exactement leur degré d'érodibilité.

On peut déduire de ces observations que l'érosion est plus importante sur les sols basaltiques ou andésitiques que sur les sols calcaires, mais les conséquences économiques varient suivant la nature du sous-sol. En effet, sur le substrat basaltique, la vitesse d'altération de la roche mère est élevée et la pédogenèse assez rapide (fig. 6) : les possibilités de restaurer la fertilité du milieu après dégradation sont relativement bonnes, tandis que sur le substrat calcaire la vitesse de la pédogenèse est beaucoup plus faible, la restauration de la fertilité, une fois le capital sol entamé ou détruit, étant réduite.

Les stratégies traditionnelles paysannes de GCES et leurs limites

Dans ces milieux aussi diversifiés, on constate que la paysannerie sélectionne, associe et répartit les espèces végétales dans le temps et dans l'espace. Ainsi, les systèmes de culture s'expriment au travers de choix raisonnés et renseignent sur le degré d'adaptation des paysans. Cette adaptation ne signifie pas pour autant qu'il y a équilibre et certaines voies d'évolution sont inquiétantes, risquant d'aboutir à terme à des ruptures.

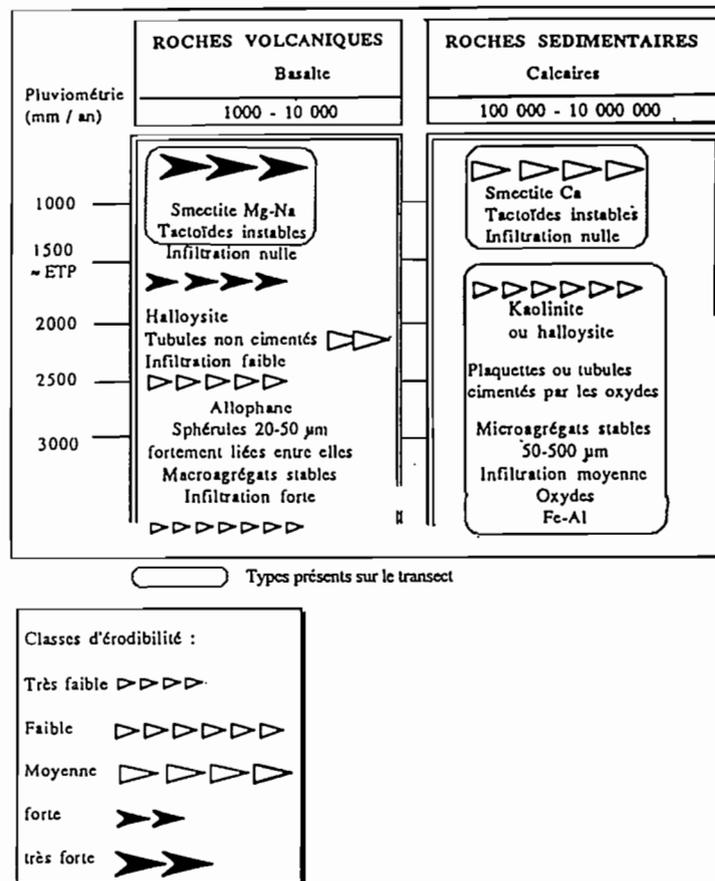
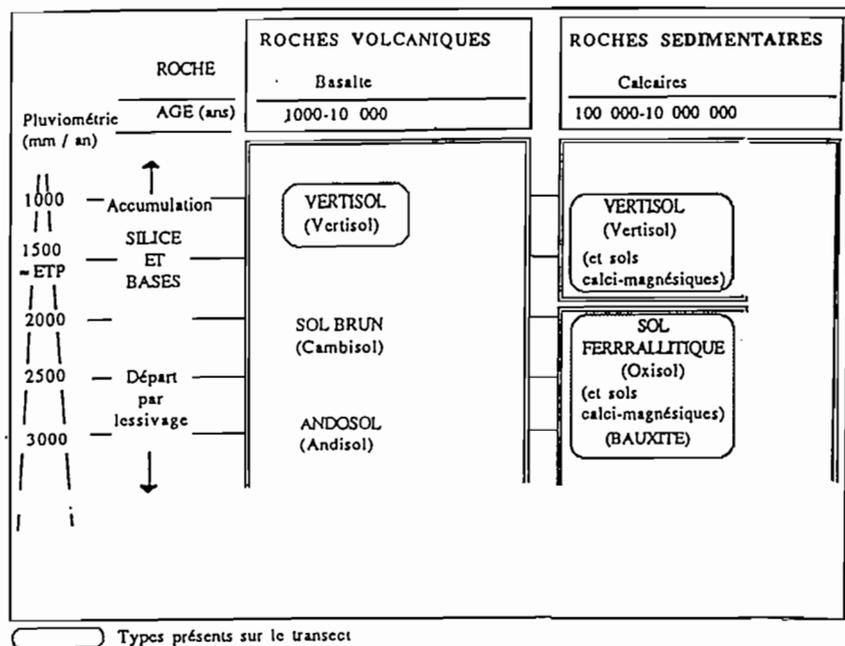


FIG. 5. — Distribution des types de sols et de leur risque à l'érosion (d'après CABIDOCHÉ 1989).
Distribution of soil type and their risk to erosion (after CABIDOCHÉ, 1989).

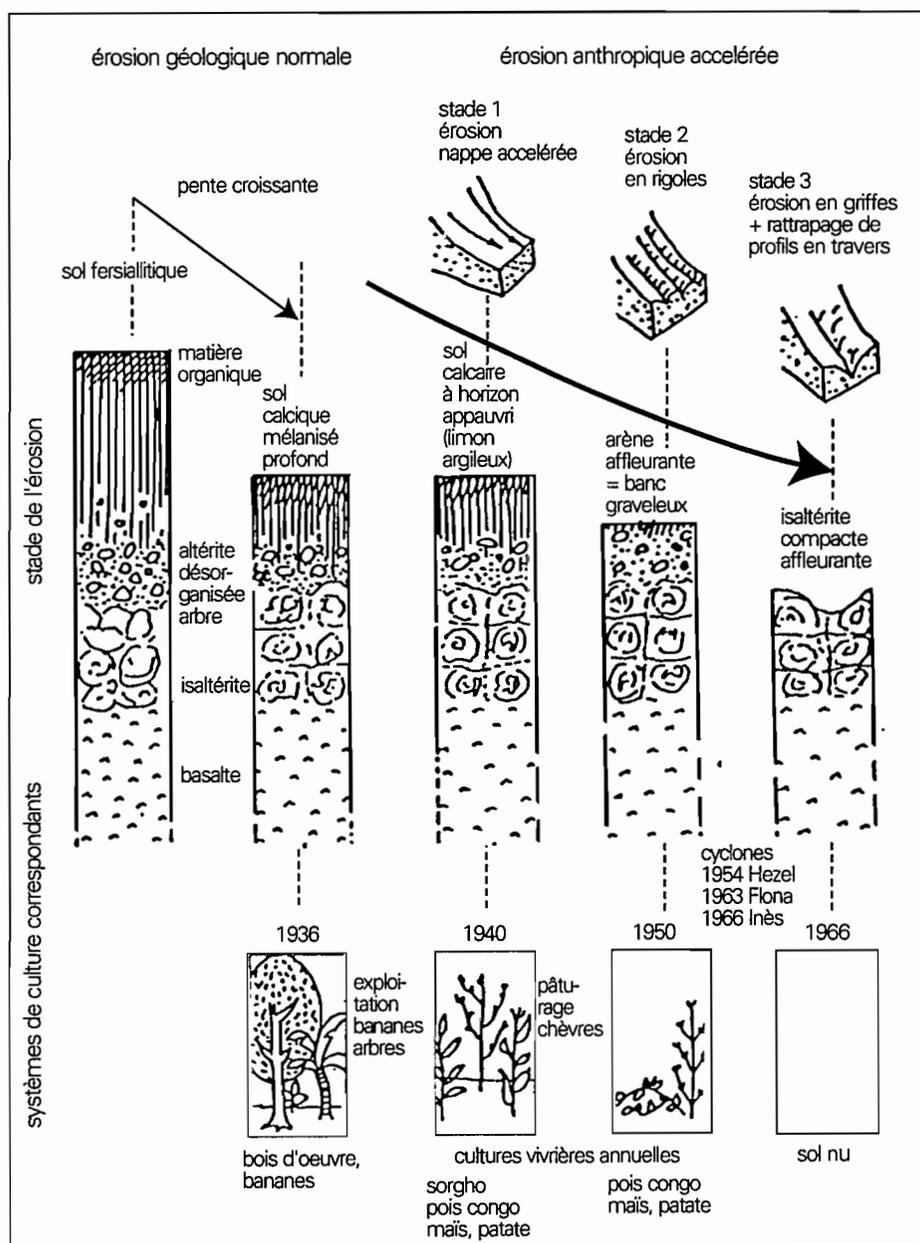


FIG. 6. — Stades et conséquences de l'érosion sur les systèmes de cultures (d'après CABIDOCHÉ, 1984).
Stages and consequences of the erosion on cropping systems (after CABIDOCHÉ, 1984).

LUTTE CONTRE LA DÉGRADATION : UNE GESTION PAYSANNE DE LA FERTILITÉ

Les « trois jardins » haïtiens

Les trois jardins se caractérisent par des transferts de fertilité de l'un à l'autre par l'intermédiaire du bétail.

Dans l'unité 1, chaque exploitation est constituée au moins de ces trois jardins (fig. 7).

Le jardin « devant-porte-kaye » (fig. 7, A), encore appelé « lakou » (de 500 à 1 000 m²), est une zone de végétation dense entourant la maison et toujours en propriété.

Dans ce jardin, de nombreuses espèces pérennes ou annuelles sont associées et forment plusieurs étages de végétation.

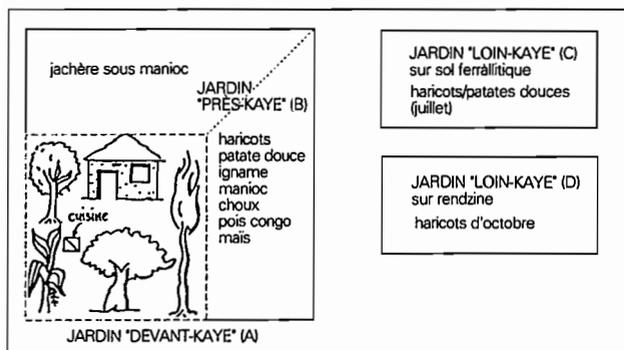


FIG. 7. — Répartition des cultures dans les différents types de jardins sur le plateau du Rochelois/Salagnac (d'après GRET/FAMV, 1991).

Crops repartition in the different types of gardens on the plateau du Rochelois/Salagnac (after GRET/FAMV, 1991).

Les espèces arborescentes forment l'étage supérieur : avocats (*Persea americana*), chadéquiers (*Citrus maxima*), sucrons (*Inga vera*), lauriers (*Ocotea leuvoxylon*), orangers amers (*Citrus aurantium*).

Les espèces arbustives forment l'étage intermédiaire : bananiers, caféiers, ricins.

Les espèces herbacées forment l'étage inférieur et sont adaptées à l'ombre : « malanga » (*Xanthosoma campetris*), « mazonbelle » (*Colocacia esculenta*), amarante (*Maranta arundinacea*). On y trouve aussi des cultures légumières et des lianes : igname (*Discorea* sp.), cristophine ou « mirilton » (*Sechia edulis*), giraumon (*Cucurbita moschata*), cive (*Allium fistulosum*).

Le jardin « près-kaye » (fig. 7, B) (de 1 000 à 5 000 m²), non boisé, est délimité par une haie vive d'arbustes afin de marquer la propriété, abriter les cultures du vent et les protéger des animaux. On y cultive en association le haricot, le maïs, l'igname, la patate douce (*Ipomea batata*) et le manioc (*Manihot utilissima*).

Les jardins « loin-kaye » (fig. 7, C), dont la surface totale est souvent supérieure à 5 000 m², sont situés dans des zones très peu boisées et éloignées de l'habitat. Ils sont en fermage, en métayage ou en indivision. Ils sont peu fertiles et dégradés. Les paysans y pratiquent une association de haricot et de patate douce pendant six mois, ensuite la parcelle est laissée en jachère pâturée. Si les jardins sont vraiment dégradés et situés sur de fortes pentes (fig. 7, D), ils sont laissés en jachère longue (plus de trois années) pour le pâturage des caprins (zone de racks).

Les exploitations de l'unité 2 présentent quelques différences par rapport à l'unité 1. En effet, le boisement important dans cette zone permet difficilement de différencier les jardins de types A et B que l'on peut assimiler à un seul grand jardin A. En revanche, il apparaît un nouveau type de jardin appelé « champ » par les paysans et composé essentiellement de bananiers (associés parfois à du malanga) sous couvert arboré. Ces jardins ne se retrouvent pas toujours près des habitations mais leur localisation dépend de la disponibilité en eau et de la fraîcheur du sol : dans les bas-fonds ou près des lits des sources.

Dans l'unité 3 existe toujours le jardin près de la maison, espace protégé et délimité par une haie continue, situé sur les mornes secs. Plus on descend en altitude et plus ce type tend à s'appauvrir : il ne subsiste que quelques arbres (cocotiers, manguiers) répartis autour de la maison. En fait, les jardins de types A et B ne s'assimilent plus qu'à un seul jardin de type B légèrement boisé. En revanche, on retrouve toujours les jardins pérennes des bas-fonds, densément boisés et à haute fertilité, qui peuvent être assimilés à un jardin de type A, transféré ici dans les espaces plus humides.

Dans l'unité 4, cette structure de jardin disparaît.

On peut déduire de cette analyse que la répartition des différents jardins est principalement déterminée dans l'unité 1 par l'éloignement des parcelles de l'habitation et dans les unités 2 et 3 par le type de sol (bas-fonds = colluvions et alluvions) et l'humidité.

Toutefois, il est important de noter que, pour gérer les réserves de matière organique, les paysans réalisent des transferts de résidus de culture d'une parcelle à l'autre (fig. 8).

Si la fertilité de certains jardins (le plus souvent en propriété) qui se trouvent près des habitations augmente, cela se fait au détriment des autres, plus éloignés (le plus souvent en métayage ou en fermage) qui voient leur fertilité baisser à cause des exportations régulières de résidus de culture vers les autres parcelles à plus grande sécurité foncière. Les paysans ont peu intérêt à les fertiliser, ne sachant pas s'ils pourront les exploiter l'année suivante. Le facteur « tenure foncière » joue un rôle très important dans la dégradation des sols.

Le tableau II permet de mettre en évidence les différences de fertilité de ces jardins. Plus le jardin est proche de l'habitation et plus le taux de matière organique est important. Cette augmentation des stocks organiques s'accompagne de celle de la capacité d'échange cationique, du pH et de la stabilité structurale. Sur les sols ferrallitiques de Salagnac, la différence de fertilité permet d'obtenir des rendements en haricot de 3,9 quintaux par hectare sur les jardins « loin-kaye » sans restitution organique à 6,2 quintaux par hectare sur les jardins « près-kaye » recevant d'importants apports organiques.

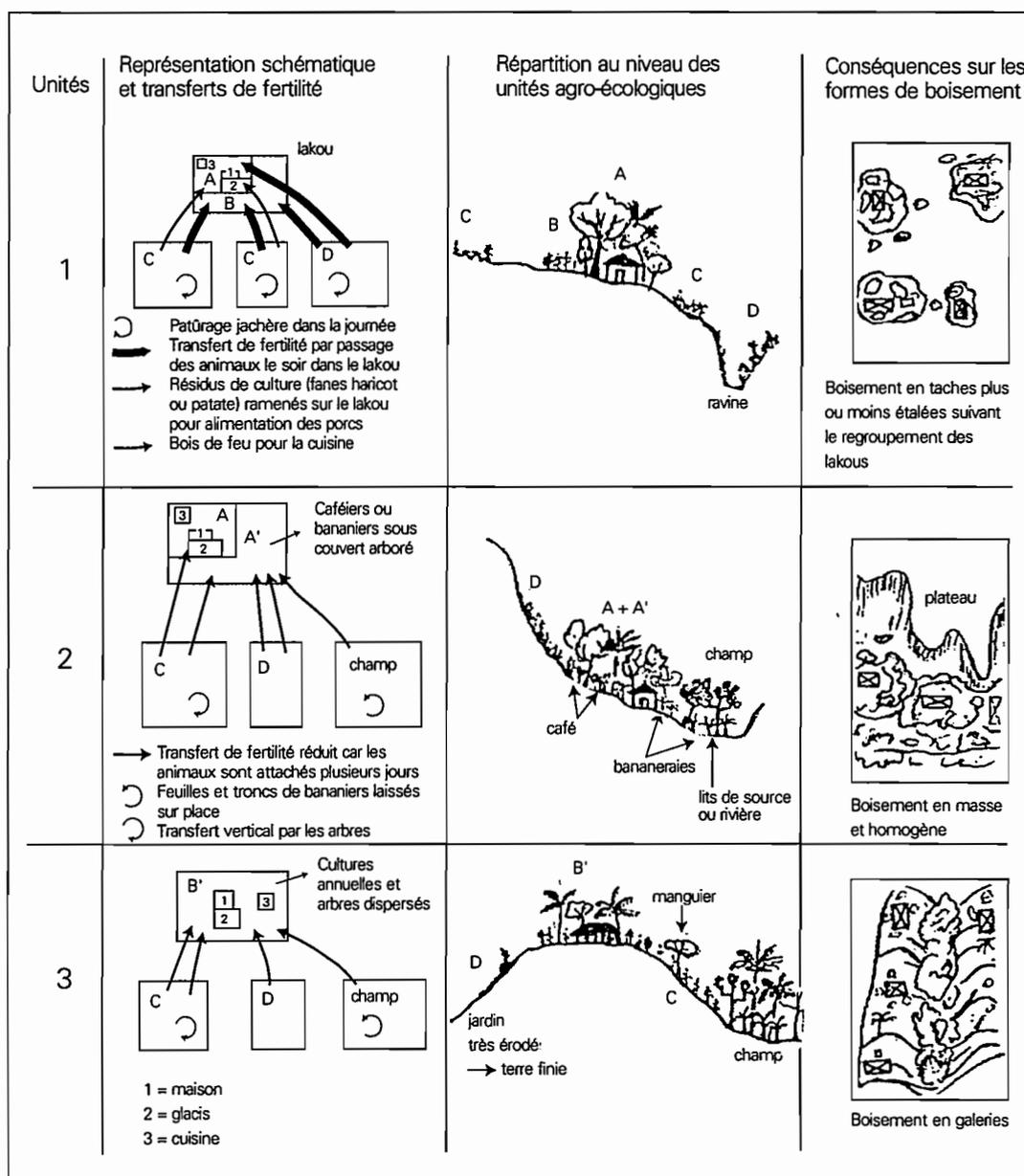


FIG. 8. — Types de jardins, transferts de fertilité et formes de boisement (d'après GUARRIGUE, 1990).
Garden types, fertility transferts and forms of afforestation (after GUARRIGUE, 1990).

La pratique de la jachère

La jachère était autrefois une pratique courante en Haïti ; malheureusement, la diminution de la disponibilité en terre impose le raccourcissement des temps de jachère et tend à faire disparaître cette pratique. Actuellement, la durée d'une jachère sur le transect peut varier de trois mois à deux ou trois ans selon les types de jardin et la disponibilité en terre du paysan.

Dans l'unité 1, les moins bonnes terres, qui sont aussi les plus éloignées de l'habitation, sont laissées en jachère un an ou deux après un cycle de culture d'un à deux ans. Pour les terres plus fertiles (plus près de l'habitat), la jachère ne dure que deux à six mois, le temps nécessaire pour fertiliser la parcelle en y laissant les animaux auxquels on apporte le fourrage. Dans le premier cas, on a une mise au repos de la terre, dans le second c'est une réelle technique de fertilisation.

TABLEAU II
Principales caractéristiques des sols des différents types de jardins
Main features of soil for the different types of garden

Analyse des horizons de surface (0-10 cm)	Jardins "devant porte-kaye"	Jardins "près -kaye"	Jardins "loin-kaye"
Taux de matière organique (%)	5 à 8	2 à 6	1 à 2
pH	6,5 à 7, 5	6 à 7	5 à 6
Capacité d'échange cationique (méq/100 g)	15 à 25	5 à 20	2 à 5
Structure	Grumeleuse et stable	Moins stable	Fine et sableuse

Dans l'unité 3, les associations (maïs, sorgho, pois congo) occupent la parcelle presque toute l'année (d'avril à février), puis dès les premières pluies (mars-avril) commence la préparation des terres. Les jachères sont donc très rares et n'interviennent que de façon très espacée. Le niveau de fertilité des sols ne dépend que du fonctionnement des associations de cultures car il n'existe pas non plus de fertilisation minérale. Lorsqu'une parcelle n'est pas mise en culture, ce sont des raisons économiques qui sont évoquées (manque de semences, peu de disponibilité en main-d'œuvre) mais jamais des raisons liées au maintien de la fertilité.

D'une façon générale, lorsque les jachères sont longues (dix-huit mois à deux ans), les animaux sont laissés au piquet sans apport de fourrage, d'abord pour y manger les résidus de récolte sur place (paille de maïs, de sorgho, fanes de patate), puis pour le pâturage. Il y a ainsi un recyclage direct de la matière organique en déjections animales qui, non fermentées et exposées au soleil, doivent subir de fortes pertes en azote. Cette technique provoque souvent un tassement du sol sur forte pente, ce qui favorise le ruissellement.

CABIDOCHÉ (1989) a observé qu'il existe un effet du type d'occupation du sol sur les stocks de carbone et d'azote (fig. 9) et qu'une jachère de longue durée, herbacée ou arbustive, permettrait de rétablir les conditions d'une meilleure nutrition azotée. En revanche, il est probable que les jachères courtes (six à dix-huit mois), souvent surpâturées, ne produisent pas ces effets et qu'elles n'aient pour autre fonction que d'assurer le maintien des animaux, éléments privilégiés de capitalisation ou au moins d'épargne, sur l'exploitation.

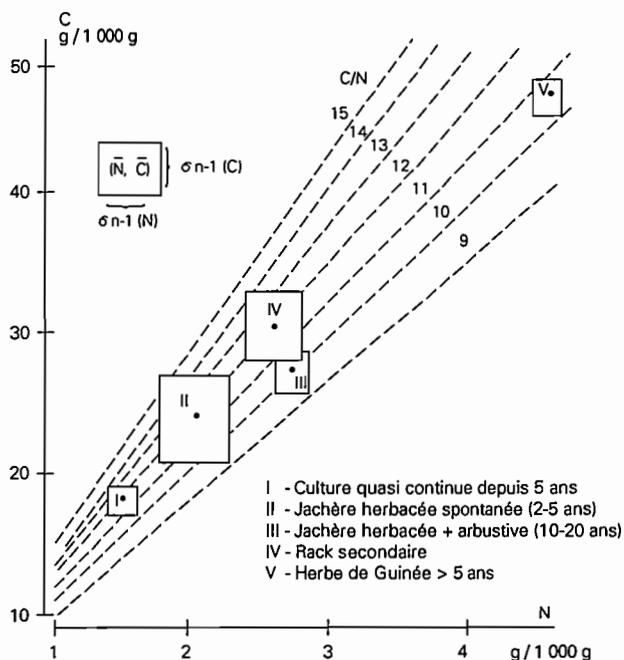


FIG. 9. — Effet du type d'occupation des sols sur les stocks de carbone et d'azote (d'après CABIDOCHÉ, 1989).
Effect of the type of soil occupation on the carbone and nitrogen stock (after CABIDOCHÉ, 1989).

Concentration de la matière organique dans les buttes

Cette pratique concerne tous les types de jardin (cf. fig. 7) : après une jachère, et un mois avant les semis et plantations, les mauvaises herbes sont sarclées, puis séchées et rassemblées en tas. Elles sont ensuite recouvertes

de terre prise dans l'horizon superficiel (15 cm), le plus riche en matière organique, pour former des buttes d'un mètre de diamètre. Cette opération va favoriser le développement racinaire par amélioration du drainage et aération. Elle permet surtout une concentration de la matière

organique dans la butte (fig. 10). Ainsi le maïs, plante la plus exigeante, est-il semé dans la situation la plus favorable tandis que le pois congo, moins exigeant grâce à son système racinaire profond et puissant, l'est dans la situation la moins favorable.

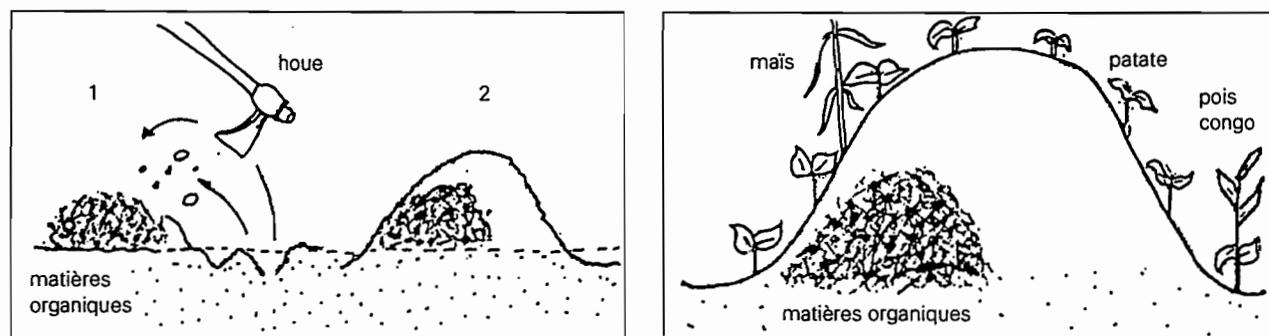


FIG. 10. — Confection d'une butte avec concentration de la matière organique (d'après GRET/FAMV, 1991).
Practice of organic matter concentration in raised-bed (after GRET/FAMV, 1991).

Le brûlis

Cette pratique est surtout courante dans les unités 3 et 4 où la matière végétale résiduelle est très ligneuse : chaumes de sorgho, tiges de pois congo, tiges de manioc. Elle est brûlée lorsqu'elle se trouve en quantité importante, car sa décomposition serait trop lente. Ce brûlis permet une préparation rapide des sols mais libère aussi une grande quantité d'éléments minéraux disponibles rapidement en début de culture. Cette technique a cependant certains désavantages : sur les sols pentus, elle favorise le ruissellement et le décapage, et ne permet pas, par enfouissement, une meilleure rétention de l'eau et un enrichissement en matière organique ; si ces sols sont bien pourvus en matière organique, la dégradation est moindre mais l'érosion diffuse est importante.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION DIFFUSE

Il s'agit d'une érosion en nappe, présente dans les unités 2 et 3 sur les pentes et dans l'unité 1 sur les sols dégradés de forte pente.

Les paysans utilisent des techniques de lutte traditionnelles dont l'efficacité est limitée. Elles ont toutefois l'avantage d'être bien intégrées aux systèmes de culture et pourraient donc être améliorées.

Les billons horizontaux sur pente sont insuffisants pour enrayer l'érosion. Ils n'ont qu'un impact limité sur le ruissellement et suivent rarement les courbes de niveau. Aussi, lorsqu'ils sont trop longs, se crée-t-il des points de concentration de l'eau ; les billons cèdent, permettant ainsi un début d'érosion linéaire lors de très fortes pluies.

Les haies vives constituées de diverses espèces pourraient avoir une certaine efficacité. Malheureusement, elles ne concernent que les parcelles proches des habitations

(jardins de types A et B), c'est-à-dire sur de faibles pentes et en propriété. De plus, elles sont surtout utilisées comme clôtures et ne sont donc pas disposées en courbe de niveau. Leur principal rôle est de lutter contre le vol et la divagation des animaux. Les espèces utilisées ne sont pas appréciées par le bétail et produisent peu de biomasse. Une fois de plus, l'investissement est réalisé sur les terrains où la sécurité foncière est la plus grande.

Les rampes de paille sont largement utilisées mais sont peu efficaces. Ce sont des petites barrières constituées de deux piliers de ligneux enfoncés dans le sol sur lesquels s'appuient d'autres résidus ligneux, avec des résidus verts de la jachère après défriche (clayonnage). Ces ouvrages ne sont pas pérennes et ne peuvent avoir d'effets cumulatifs d'une année sur l'autre. De plus, leur horizontalité est approximative et leur perméabilité trop grande.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION LINÉAIRE

Pour éviter les rigoles ou les griffes, les techniques de clayonnage sont également utilisées par les paysans, mais elles sont plus rares du fait que ces formes d'érosion se manifestent surtout dans les unités 3 et 4 où la végétation est moins abondante.

Pour les petites et moyennes ravines, les agriculteurs construisent des petits seuils en matériel végétal ou en pierre, mais cette pratique n'est pas courante et nécessite des précautions et de l'entretien : l'ouvrage est souvent fragile et il est alors emporté lors des grosses pluies.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION EN MASSE

Il n'y a pas de lutte traditionnelle contre cette forme d'érosion. De plus, ce phénomène est souvent accéléré par le travail du sol réalisé par les paysans sur les pentes. En

effet, chaque année, au moment de la préparation des buttes ou des billons, l'exploitant, travaillant de haut en bas, provoque une « descente » d'une portion de la terre (cf. fig. 10). Il y a donc glissement progressif des matériaux de la couche superficielle.

UNE FORME DE GESTION DE LA BIOMASSE : LES JARDINS BOISÉS

Nous avons déjà parlé de l'existence de la strate arborée dans les différents jardins et de leur répartition spatiale dans les différentes unités écologiques. L'arbre, malgré ce qu'on en dit, joue toujours un rôle très important dans l'espace haïtien. Ce rôle est parfois en évolution ou en régression, suivant les situations. Mais sa gestion est étroitement liée aux facteurs de production des systèmes d'exploitation (tenure foncière, niveau de revenu, mode de conduite de l'élevage, forme de l'héritage (3), etc.). La typologie schématique de ces jardins boisés répartis sur le transect (tabl. III) ainsi que leurs trajectoires d'évolution permettent d'expliquer leur dynamisme dans le temps et les contraintes principales au développement des espaces boisés agroforestiers.

Le paysan haïtien est conscient du rôle des espaces boisés dans l'environnement (meilleure infiltration des eaux de pluie, production de biomasse, diminution des phénomènes de battance et de l'érosion en masse), mais les contraintes exogènes (pression foncière) et endogènes (revenu faible d'où vente de charbon de bois) à l'exploitation font qu'il lui est souvent difficile de gérer et maintenir ce patrimoine. De plus, le système traditionnel d'élevage au piquet exclut les plantations. L'élevage, de par son rôle d'épargne et de revenu monétaire, reste prioritaire par rapport à l'arbre. Les plantations d'espèces arborescentes ou arbustives nécessitent un changement profond des modes de conduite de l'élevage.

Toutes ces techniques traditionnelles de lutte antiérosive confirment que le paysan haïtien est artisan du paysage agricole. Si sa faculté d'adaptation est remarquable, il faut reconnaître que la logique de production ainsi que la dynamique suivies par la société rurale haïtienne induisent des points de rupture remettant en cause la reproductibilité de certains systèmes. On distinguera parmi les causes principales de cette évolution :

- un espace agricole très contraignant exposé aux érosions de toutes formes ;
- des problèmes fonciers faisant obstacle à l'aménagement des parcelles ou versants et favorisant également l'érosion ;
- des changements brutaux dans les techniques, issus de ruptures économiques (marché du café), qui obligent

le paysan à introduire de nouvelles cultures ou tout du moins à les exploiter à une autre échelle et de façon plus intensives, ce qui accélère les processus de dégradation (défriche-brûlis et cultures sarclées) ;

— cette intensification ne permet plus au stock de matière organique de se renouveler, il n'y a plus assez de restitutions. De même, le travail du sol accélère le glissement de la couverture pédologique : en quelques années (six à huit), une terre « mêlée » peut devenir une terre « finie ».

Il faut donc renforcer toutes ces pratiques traditionnelles paysannes de gestion de l'eau et de la fertilité des sols ainsi que les techniques culturales, afin d'améliorer la gestion des eaux de surface, augmenter les apports organiques (puis minéraux), et renforcer la couverture végétale en favorisant l'embocagement.

LA GCES APPLIQUÉE AU SUD D'HAÏTI : LES ACTIONS ENGAGÉES

Depuis quelques années, le projet « Salagnac » a mis en place une série d'actions importantes (filiale maraîchère, magasin d'intrants géré par une association paysanne, caisse populaire d'épargne et de crédit, citernes individuelles et communautaires). La situation était idéale pour qu'un projet s'investisse dans la gestion de l'environnement (projet Pratic) en s'appuyant sur cette dynamique.

Actuellement, en matière d'intensification de la production végétale, trois filières présentent un avenir prometteur pour les zones de montagne densément peuplées :

- le couple maraîchage-vivrier : les cultures maraîchères sont des têtes d'assolement qui financent l'apport d'engrais minéraux, ce qui permet souvent de doubler les rendements des cultures vivrières ;
- l'arboriculture fruitière, avec un marché important qui se développe vers les États-Unis ;
- l'élevage bovin laitier qui permet une bonne diversification des productions.

Les solutions envisagées ont permis de répondre aux problèmes que posent la production et les exploitations agricoles à l'échelle du bassin versant et de la parcelle. Ainsi, pour chacune des unités agroécologiques, des propositions techniques ont été testées (fig. 11), puis certaines réalisées à plus grande échelle.

Il s'agissait de mieux gérer tant les eaux de surface que la fertilité et la biomasse, d'améliorer la conduite de l'élevage, de développer l'agroforesterie. Ces propositions étaient accompagnées par des actions complémentaires.

(3) Après la mort du couple exploitant, le jardin « près-kaye » peut être conservé, divisé en plusieurs jardins de type A, ou détruit (coupe des arbres et partage des cultures), puis abandonné, le nombre d'héritiers rendant impossible un partage équitable des biens : l'espace devient une terre indivise.

TABLEAU III
Typologie des jardins boisés (d'après GUARRIGUE et SMOLIKOWSKI, 1990)
Typology of wooded gardens (after GUARRIGUE and SMOLIKOWSKI, 1990)

Désignation	Caractéristiques	CATÉGORIES			TYPES					
		Nom	N°	Caractéristiques	Densité/ha	Couverture pérenne du sol	Localisation sous-unités	Contraintes milieu	Sécurité de tenue	Évolution vers type
1 JARDIN PÉRENNE 	Couverture pérenne dominante	Jardin A	11	Jardin boisé autour de l'habitation Tubercules associées Haute fertilité	300 à 600	40% à 90 %	1.1 1.2 2.2	Taux de matière organique faible (départ) sauf pour sous-unité 2.2	Forte	2.1 ou 2.2
	Densité d'arbres : 200 à 800/ha Haut niveau de fertilité	Cultures pérennes sous couvert hors lakou	12	Jardin boisé hors lakou organisé en 2 étages : cultures pérennes (caféiers, bananiers) et arbres	400 à 800	60 % à 100 %	2.2 2.3 3.1	Peu en 2.2 Vertisols compacts et risque d'hydromorphie en 2.3 et 3.1	Moyenne à forte	1.1 ou 2.2
2 JARDIN ANNUEL BOISÉ 	Couverture pérenne < 10 %	Parcelle boisée à gestion passive	21	Stock d'arbres exogènes peu ou pas renouvelé Productions arboricoles faibles Boisement en voie de dégradation	< 20 à 200	1 % à 5 %	1.2 2.1 3.2 3.3	Pentes fortes Pierrosité Sols superficiels Vent	Faible à forte	2.2 à 3.1
	Boisement clairsemé Cultures annuelles prépondérantes Fertilité moyenne à faible	Parcelle boisée à gestion active	22	Stock ligneux renouvelé et amélioré Productions arboricoles importantes Boisement stabilisé ou en augmentation	150 à 300	5 % à 10 %	1.1 1.2 2.2 3.2	Faible fertilité Pentes fortes Pierrosité Vent	Moyenne à forte	1.1 à 2.1
3 RAK 	Formation ligneuse secondaire dense	Rak naturel	31	Recrû de ligneux sur zones marginales	5 à 10 000	90 % à 100 %	1.4 2.1 3.4	Pentes très fortes falaises Accès difficile	Faible	2.1 ou parcelle nue
	Hauteur limitée < 8 m	Rak volontaire	32	Retour en friche de zones cultivées	10 à 30 000	100 %	3.1 3.2	Pas de contraintes majeures	Forte	Tous types
4 HAIES VIVES 	Alignement d'arbres et d'arbustes en limite de parcelle	Lisière arborée	41	Alignement d'arbres forestiers avec espacement > 1 m	0,5 à 1/m		Toutes	Vents violents	Forte	
		Haies denses	42	Mélanges d'arbres et d'arbustes avec une densité > 6/m	7 à 10/m		Toutes	Pas de contraintes majeures	Moyenne à forte	

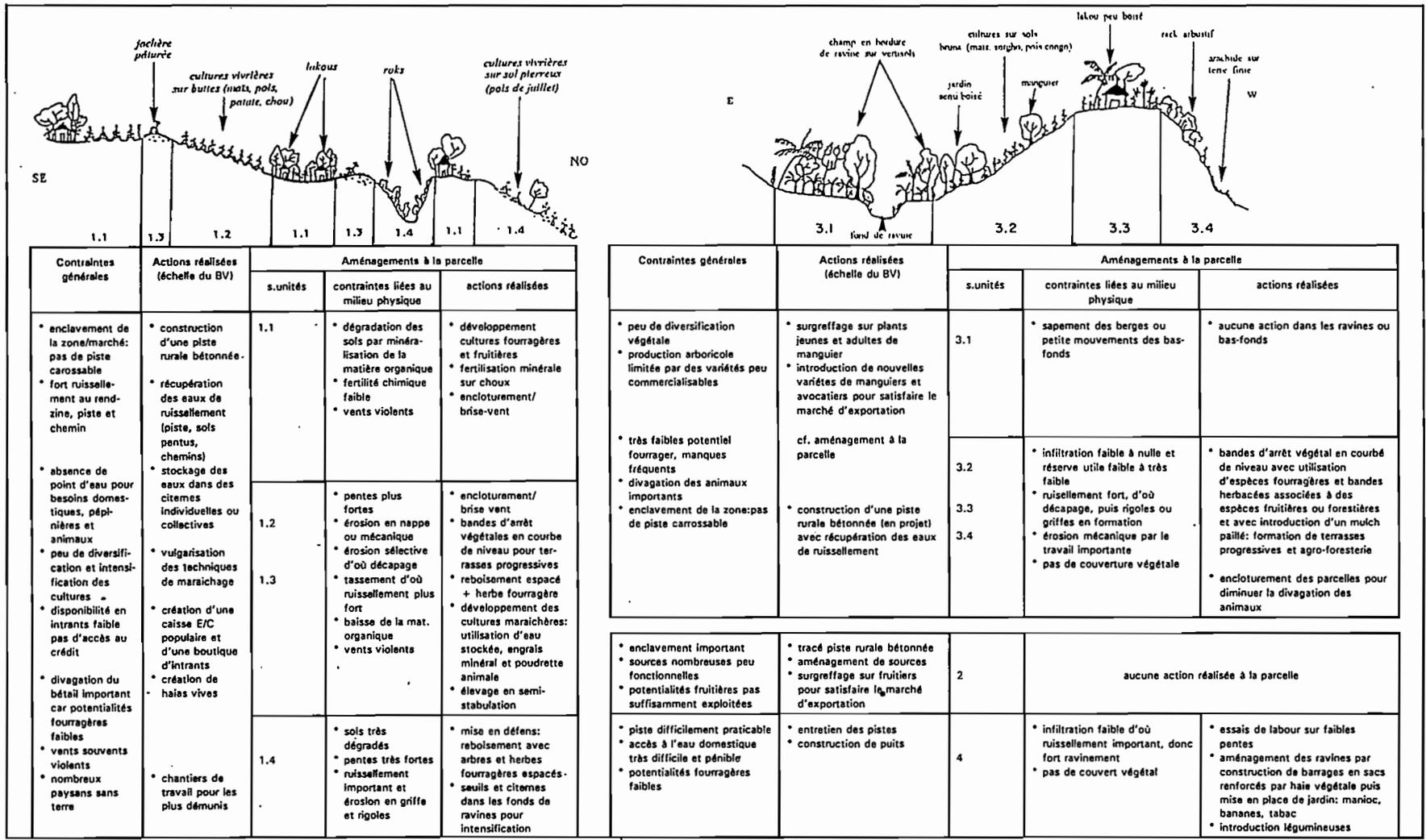


FIG. 11. — Types d'aménagements et principales actions de développement réalisés dans les sous-unités agroécologiques du transect (d'après SMOLIKOWSKI, 1991).
 Types of management structures and main development activities carried out in the agro-ecological sub-units of the target area (after SMOLIKOWSKI, 1990).

Propositions pour mieux gérer les eaux de surface

CAPTURE DU RUISSELLEMENT, DIVERSION ET MISE EN VALEUR DES EAUX DANGEREUSES

La capture de ces eaux s'est faite surtout dans les unités 1 et 2. Elle permet :

— la protection des zones à bonnes potentialités agricoles (jardins de types A et B, sols à bon potentiel agricole) contre les eaux de ruissellement ; ainsi, la construction de trois kilomètres de piste bétonnée (60 FF/m) en aval des terres à fort ruissellement (rendzines) et en amont des sols ferrallitiques a-t-elle été réalisée et elle a permis la récupération de ces eaux ; cette piste rurale sert d'impluvium, elle est protégée par des murettes et renforcée par des canaux-exutoires vers les ravines torrentielles ;

— l'amélioration des disponibilités en eau, totalement absente en zone 1, pour les besoins domestiques, l'irrigation d'appoint (établissement de petites pépinières maraîchères individuelles avant saison) et l'abreuvement du bétail en semi-stabulation ; d'où une plus grande disponibilité en main-d'œuvre pour l'exploitation en la libérant des corvées longues et pénibles d'approvisionnement en eau (de deux à trois heures par jour).

Ces eaux sont stockées soit dans des citernes collectives de plein champ (de 50 à 150 m³) lorsqu'elles proviennent des pistes, chemins ou sols pentus érodés, soit dans des citernes individuelles (8 à 12 m³) lorsqu'elles proviennent des toits des maisons. Environ vingt citernes de plein champ ont été réalisées (200 FF/m³) ainsi que 550 citernes individuelles (180 FF/m³).

De même, des seuils en pierres (unité 1) favorisant le piégeage des transports solides et des écoulements d'eau dans les petites ravines ont été construits afin de créer des îlots de fertilité valorisés rapidement par les agriculteurs.

Toutes ces infrastructures ont également permis :

— le désenclavement de ces zones d'accès difficile : la piste rurale facilite le transport de la production agricole vers les marchés et permettra, à terme, de diminuer la charge élevée en animaux de bât utilisés pour le transport des produits ; cela pourrait permettre de réduire en partie le surpâturage ;

— l'amélioration immédiatement perceptible du revenu par la création d'emplois pour les plus démunis (salaires distribués pour la construction des ouvrages dits « communautaires » : pistes, citernes, murettes de protection et seuils).

Le choix des ouvrages et de leur emplacement est fait à partir de l'étude de chaque sous-bassin, avec la participation des paysans : on a déterminé les zones à fort ruissellement, les zones à bonnes potentialités agricoles à protéger, les emplacements pour déverser les excès d'eau

dans les ravines torrentielles, le passage de la piste. Le raisonnement a parfois intégré des éléments des systèmes de production : construction des citernes à proximité des zones où le maraîchage est déjà bien développé.

INFILTRATION MAXIMALE ET DISPERSION DE L'ÉNERGIE DU RUISSELLEMENT

Plusieurs techniques permettant une meilleure infiltration ont été utilisées sur de nombreuses parcelles paysannes, essentiellement dans les unités 1 et 3. Il s'agit simultanément de techniques culturales comme le paillage et de l'établissement de haies vives, c'est-à-dire l'implantation d'une végétation pérenne, en courbe de niveau. Tous ces aménagements, en jouant le rôle de bandes d'arrêt des sédiments transportés lors du travail du sol (érosion de masse provoquée par le travail de « haut en bas » lors de la préparation des terres) et pendant les fortes pluies par l'érosion en nappe, devraient conduire, à moyen terme, à la mise en place de terrasses progressives. Ce procédé nécessite un entretien simple, particulier et régulier. Il s'appuie sur les techniques traditionnelles de clayonnage et de clôture en haies vives, et permet de ralentir le ruissellement lorsque la haie est renforcée par ses propres résidus végétaux (coupe des ligneux lors de son exploitation et son entretien) et des résidus de récolte (branchages et paille) qui s'appuient contre cette végétation pérenne. Il faut cependant renforcer la végétation vivante dans les zones fragiles et placer de nouveaux filtres de résidus végétaux lorsque les anciens sont détruits ou recouverts de terre, afin d'éviter la formation de brèches.

La mise en place de haies vives est une des techniques les plus vulgarisées par le projet. Cette pratique est particulièrement bénéfique sur les sols basaltiques (unité 3) car la vitesse d'altération des matériaux est très rapide et les possibilités de restaurer la fertilité du milieu après sa dégradation sont excellentes.

Sur le calcaire (unité 1), ces possibilités sont extrêmement réduites. La technique est intéressante sur des parcelles ayant conservé de bonnes potentialités.

En ce qui concerne l'unité 2, peu d'aménagements de ce type ont été réalisés. Cette zone présente encore une bonne couverture arborescente et n'a pas été considérée comme prioritaire par les projets.

Pour la plaine d'Aquin (unité 4), la technique des haies vives est utilisée pour aménager les fonds de ravine. La mise en place de barrages végétalisés se fait sur les atterrissements (sols plus profonds, riches en matières organiques et à bonne humidité) provenant de l'érosion torrentielle provoquée par les pluies et bloquée par des petits barrages en sacs remplis de terre. Cette retenue permet la culture d'espèces économiquement rentables telles que les bananiers, les ananas et les cocotiers.

Propositions pour mieux gérer la fertilité des sols et la biomasse

Il est primordial, si l'on veut augmenter la productivité des terres et du travail, de procéder à une meilleure gestion de l'eau mais aussi des nutriments et de la matière organique.

Ainsi, pour améliorer le « turnover » et le cycle des nutriments, il convient de revoir l'utilisation de la biomasse disponible. Celle-ci devrait considérablement augmenter avec la production des haies vives nouvellement implantées.

Le projet a commencé à vulgariser l'utilisation d'un paillis non enfoui avec un mélange de résidus de *Leucaena* ou de *Gliricidia sepium* et de paille de maïs ou de sorgho dans les unités 1 et 3 sur les sols pentus. Sur les sols basaltiques, il est probable que cette couverture permettra de résoudre 80 % des problèmes de ruissellement et d'érosion. Sur les sols calcaires, elle permettra d'améliorer considérablement les bilans de matière organique souvent très faibles. Cette technique se développe déjà avec beaucoup de réussite sur les parcelles maraîchères, où est épandu de l'engrais minéral et organique sous forme de poudrette bien localisée. L'association poudrette-paille permet la production de « vrai fumier » qui fixe mieux l'azote des déjections.

Propositions pour mieux gérer l'élevage

Le bétail représente une épargne, excepté pour les bovins, qui tourne vite. Cependant, sa conduite, en Haïti, présente actuellement de nombreux inconvénients :

— libre, il empêche et détruit tous les aménagements biologiques ;

— au piquet, il tasse le sol, provoque le surpâturage et favorise le ruissellement.

Sous l'impact du projet Salagnac-Aquin qui intervient sur la production laitière, l'élevage tend vers une conduite en « semi-stabulation » : en étable durant la nuit, puis au piquet durant la journée ou en promenade vers les points d'eau. Cette technique de conduite a pu se développer grâce à une augmentation de la production de fourrage (haies vives), à la multiplication des points d'eau (citernes), mais également à la multiplication des clôtures de protection qui réduisent la divagation.

L'importance de l'agroforesterie dans les techniques proposées

Les techniques agroforestières développées par le projet permettent de répondre simultanément à plusieurs nécessités :

— amélioration de l'infiltration par ralentissement des écoulements ;

— augmentation de la production de biomasse (environ 3 à 5 t/ha/an si la distance entre les talus est d'environ 10 m) qui peut être utilisée pour améliorer la fertilité par restitution organique, par l'épandage sur le sol des résidus issus de la taille des arbustes-légumineuses (cette biomasse est ainsi restituée rapidement et les nutriments de façon plus progressive) ; enfin, elle est très utile pour l'alimentation du bétail (coupe des graminées et légumineuses), pour la production de bois de feu et, à plus long terme, de fruits et de bois d'œuvre ;

— réduction, par synergie avec les effets précédents, des problèmes d'érosion par le blocage des divers processus de transport des éléments solides ;

— amélioration de la protection contre les vents et la divagation des animaux.

L'objectif n'est pas de reforester tous les espaces dégradés mais plutôt de :

— couvrir les pentes de 40 à 60 % en réimplantant un parc aéré afin de ralentir la migration de la couverture pédologique par la plantation d'arbres sur les terres très dégradées, de façon éparsée sur les parcelles ; dans les unités 1, 2 (calcaire marneux) et 3, des espèces fruitières (150 à 1 hectare) sont installées dans des cuvettes de 0,5 m³ avec une bonne concentration de matière organique ;

— cloisonner le paysage par des talus complexes et en marquant la bordure des parcelles avec des haies brise-vent forestières/fourragères, tout en favorisant la mise en place de terrasses progressives.

L'installation de clôtures de protection contre la divagation des animaux, comme brise-vent et aussi comme fixation du talus (passage d'une route, d'un chemin) permet également de marquer la « propriété » et incite à une plus grande intensification de la parcelle (mise en place de cultures maraîchères, plantation de fruitiers). La technique du macrobouturage est adoptée pour l'implantation des clôtures, ensuite renforcées par la plantation d'arbres forestiers.

Diverses espèces ont été utilisées (tabl. IV) pour la mise en place de ces aménagements. Elles tiennent compte des facteurs de production (tenure, éloignement, SAU), des besoins des exploitations (fourrage, bois, fruits, etc.) mais aussi des potentialités du milieu physique à l'échelle de la parcelle, suivant les sous-unités décrites précédemment. Ces espèces sont réparties sur l'aménagement de façon raisonnée :

— herbes fourragères sur les talus en formation afin de jouer un rôle fixateur et de deuxième filtre ;

— haies vives de légumineuses conduites en arbustes (deux à trois tailles par an) en amont du talus tous les 25 cm ;

— arbres forestiers ou fruitiers en aval (ou en amont sur les sols très humides) espacés de 5 à 8 m suivant l'écartement entre chaque talus.

TABLEAU IV

Choix des espèces utilisées en fonction des facteurs agroécologiques
et des types de structures (d'après BROCHET et SMOLIKOWSKI, 1990)
*Choice of vegetal species used taking into consideration the agro-ecological factors and the types of
structures realised (after BROCHET and SMOLIKOWSKI, 1990)*

Sous- unités	Clôtures végétales		Haies en courbe de niveau			Plantations en ligne ou dispersées
	conduites en arbre	conduites en arbuste	conduites en arbre	conduites en arbuste	herbacées	
1.1	<i>Grevillea robusta</i> <i>Cedrela odorata</i> (cèdre) <i>Cassia siamea</i> (casse) <i>Morus alba</i> (murier)	<i>Hibiscus rosasinensis</i> (choublack) <i>Erythrina indica</i> (pignon) <i>Bursera simaruba</i> <i>Comocladia domingensis</i> (bois pagnol)	<i>Citrus maxima</i> (chadequier) <i>Citrus sinensis</i> (oranger) <i>Cedrela odorata</i>	<i>Leucaena diversifolia</i> <i>Gliricidia sepium</i> <i>Calliandra calothyrsus</i> <i>Hibiscus rosasinensis</i>	<i>Panicum maximum</i> (h. de Guinée) <i>Pennisetum purpureum</i> (h. éléphant)	néant
1.2	<i>Grevillea robusta</i> <i>Pinus occidentalis</i> (bois pin) <i>Ocotea leucoxylo</i> (laurier sable)	<i>Erythrina indica</i> <i>Gilberta arborea</i> (bois négresse) <i>Comocladia domingensis</i> <i>Bursera simaruba</i> (gommier)	idem 1.1 + <i>Grevillea robusta</i>	<i>Leucaena diversifolia</i> <i>Hibiscus rosasinensis</i>	<i>Pennisetum purpureum</i> <i>Tripsacum laxum</i> (h. Guatemala)	néant
1.3	<i>Pinus occidentalis</i> <i>Casuarina equis.</i> (filao)	idem 1.2 + <i>Leucaena diversifolia</i>	<i>Pinus occidentalis</i> <i>Casuarina equiset.</i>	idem 1.2	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Pinus occidentalis</i> <i>Casuarina equis.</i>
1.4	idem 1.3	idem 1.3	<i>Persea americana</i> (avocatier)	néant	néant	idem 1.3
2	PAS D'INTERVENTION					
3.1	NÉANT					<i>Persea americana</i> <i>Manguijera ind.</i>
3.2	<i>Swietenia mahogany</i> (acajou) <i>Macrocatalpa longissima</i> (chêne) <i>Lisyloma latisiliqua</i> (tavernon) <i>Pithecellobium saman</i>	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Leucaena leucocephala</i> <i>Jatropha curcas</i> (médecinier)	<i>Persea americana</i> <i>Manguijera indica</i> <i>Citrus aurantifolia</i> (lime) <i>Annona reticulata</i> (cachiman cœur de bœuf)	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Hibiscus rosasinensis</i>	<i>Pennisetum purpureum</i>	néant
3.3 et 3.4	<i>Haematoxylum campechianum</i> (campêche) <i>Lisyloma latisiliqua</i>	<i>Jatropha curcas</i> <i>Gliricidia sepium</i>	<i>Anacardium occidentalis</i> <i>Citrus aurantifolia</i> <i>Annona reticulata</i>	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Leucaena leucocephala</i>	néant	néant
4	Aménagement de ravines		<i>Annona reticulata</i> <i>Manguijera indica</i> <i>Tamarindus indica</i>	néant	<i>Musa sp.</i> <i>Pennisetum pur.</i> <i>Ananas</i>	néant

Les actions complémentaires d'accompagnement

Ces actions sont indispensables et concernent plusieurs domaines.

INTRODUCTION DE CULTURES PLUS VALORISANTES : LES CULTURES MARAÎCHÈRES

Cette diversification des cultures dans les unités 1 et 2 est la courroie de transmission entre aménagement, amélioration de la fertilité des sols et augmentation de la productivité et de la production, le corollaire étant une augmentation du revenu. C'est parce que ces productions de rente se développent de plus en plus que les paysans souhaitent maintenant mieux protéger et donc mieux gérer leur espace. Les actions complémentaires doivent accompagner l'aménagement. La culture du chou, qui a connu un essor considérable, le confirme. Elle nécessite un in-

vestissement important : achat d'intrants (semences, engrais, produits de traitement), apport de matière organique, transport d'eau. Elle est souvent pratiquée dans les jardins de type C ou D éloignés des habitations. Pour cette raison, les paysans souhaitent les aménager (brise-vent, clôture, plantation d'herbe pour valoriser au mieux les engrais, citernes à proximité, arbres fruitiers) afin de permettre une bonne protection de cette culture de rente et de bien rentabiliser leur investissement. Ainsi, c'est la première fois qu'un transfert de fertilité s'effectue vers les jardins de type C ou D.

ACTIONS SUR L'ÉLEVAGE

L'effort est mis actuellement sur l'augmentation de la production de lait, qui passe par des actions d'amélioration de l'alimentation, de la conduite des animaux et des facteurs génétiques.

DIVERSIFICATION DES PRODUCTIONS FRUITIÈRES

Plusieurs campagnes de surgreffage (les greffes sont effectuées sur des arbres adultes de plus de cinq ans) ont été réalisées sur l'ensemble du transect pour introduire des variétés améliorées (oranges, mandarines et pamplemousses) pour le marché américain ou de contre-saison (mangiers, avocatiers) pour le marché national.

AMÉLIORATION DE LA SÉCURITÉ FONCIÈRE

Les aménagements proposés constituent un investissement important en travail, parfois en argent. Pour le paysan, ces aménagements dont la rentabilité n'est pas immédiate sont d'autant plus importants que la sécurité foncière est bonne. Dans bien des cas, un propriétaire peut vouloir reprendre sa parcelle jusqu'alors placée en fermage ou en métayage, ou bien en augmenter la rente ou le fermage. Pour cette raison, la majorité des aménagements se trouve sur des parcelles en faire-valoir direct, ce qui limite les interventions à l'échelle du versant ou du sous-bassin versant.

De la même façon, l'application de techniques d'intensification (utilisation d'engrais minéral et organique) se fera difficilement si la parcelle est en métayage voire en fermage de courte durée, bien que la rentabilité puisse être immédiate. En effet, cet investissement risque de profiter au propriétaire qui peut souhaiter récupérer son terrain l'année suivante. Nous avons vu qu'en général les parcelles les plus dégradées sont celles où la sécurité foncière est la plus mauvaise et qu'il y a toujours des exportations de ces parcelles vers les autres.

Des essais de baux à long terme (huit à dix ans) ont été réalisés lors de la signature du contrat entre le projet, le propriétaire et le fermier (le cas est plus complexe avec les métayers), offrant ainsi une plus grande sécurité sur le foncier et donnant au fermier le droit de jouir de la production, résultat de ses investissements.

LES EXPÉRIMENTATIONS EN MILIEU PAYSAN

Elles sont très importantes et doivent avoir un aspect démonstratif. Ce sont :

— des essais d'introduction de la technique en billons cloisonnés en remplacement des buttes à patate sur des sols ferrallitiques des fortes pentes (sous-unité 1.2) ; cet essai n'a pu être prolongé ;

— des essais sur différentes structures biologiques horizontales avec divers matériels végétaux (*Gliricidia sepium*, *Calliandra*) ;

— des études plus rigoureuses sur les risques d'érosion par ruissellement pour différents systèmes de culture, sur l'impact des haies en courbe de niveau et de leurs techniques de gestion, sur les bilans (hydrique, fertilité, érosion,

production de biomasse). Ces essais n'ont jamais pu être réalisés, les financements de la Coopération française ayant été suspendus en octobre 1991.

CONCLUSION

Il y a eu en Haïti de nombreux projets de développement rural sectoriels qui ont abouti souvent à déséquilibrer le milieu physique par la mise en place de techniques mal intégrées et rarement bien entretenues.

Avec la stratégie de gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), un nouvel espoir se dégage dans les méthodes d'approche pour l'intervention dans le milieu rural. Ces méthodes démontrent qu'il n'est pas contradictoire de concevoir un développement de la production agricole (intensification et diversification des productions végétales et animales, amélioration de la productivité) tout en protégeant et en conservant l'environnement (fertilité, conservation des sols et de l'eau), véritable support de ces productions. Une telle stratégie doit s'identifier au paysage humain. Sa réussite dépend de la connaissance du fonctionnement des systèmes d'exploitation et de celle du milieu physique, plus particulièrement du potentiel sol.

En effet, les paysans continuent à utiliser des techniques de gestion du milieu « à moindre déséquilibre » sans toutefois freiner la dégradation de la couverture pédologique, dégradation qui s'accélère sous l'effet de l'érosion dont les processus variés s'expliquent, nous l'avons vu, par la grande diversité du milieu physique mais aussi du milieu socio-économique. Il en résulte que ces sols risquent, à terme, de ne plus assurer leurs fonctions de support des systèmes de culture, d'alimentation en eau et oxygène, de nutrition minérale et azotée.

On ignore encore comment se réalisent les flux d'éléments nutritifs dans ces systèmes de culture traditionnels, ni quelles sont la vitesse de diminution de leurs stocks et les répercussions sur les rendements. Il est probable qu'en l'absence de jachère longue, pratique qui tend à disparaître devant la pression foncière, la pérennité de tels systèmes ne dépassera pas l'ordre de grandeur décennal (au moins pour les sols de l'unité 1) s'il n'y a pas une amélioration profonde des pratiques de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

Cette amélioration ne doit pas pour autant sacrifier les pratiques traditionnelles des agriculteurs. Au contraire, il est absolument nécessaire de s'appuyer sur elles et de les rénover si l'on souhaite trouver des solutions adaptées. C'est une garantie de leur adoption par les paysans et de la continuité des actions d'aménagement, d'intensification de la production et de protection de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT (A.), 1990 — *Note sur la distribution des sols du bassin versant Bitako-Petite rivière de Nippes (Péninsule sud de la république d'Haïti)*. Orstom-Martinique, 11 p.
- BELLANDE (A.), 1982 — *Rationalité socio-économique des systèmes de production dans la zone de Madian-Salagnac*. Thèse, univ. Mac Gill, 165 p.
- BOUCHET (G.), PIERRE JEAN (L.), 1985 — *Actions de développement dans les mornes basaltiques de Laval-Poly*. Projet Fac/CEE, 14 p.
- BROCHET (M.), CAVALIÉ (J.), PILLOT (D.), REYNAL (V. DE), 1980 — *Espace rural et société agraire en transformation*. Institut français, 232 p.
- BUREAU (J.-C.), 1986 — *Note de synthèse sur les actions de conservation des sols en Haïti*. Port-au-Prince, Mission de coopération, 90 p.
- CABIDOCHÉ (Y.-M.), 1984 — *Reconnaissance pédologique dans le district de Jacmel*. Inra-Guadeloupe, 41 p.
- CABIDOCHÉ (Y.-M.), 1989 — *Distribution et propriétés des sols sur le transect Madian-Salagnac-Aquin*. Inra-Guadeloupe, 35 p.
- GRET/FAMV, 1991 — *Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne*. Gret-FAMV, 489 p.
- Groupe de recherche-développement (GRD), 1979 — *Mode de tenure en Haïti et degré de sécurité à Madian-Salagnac*. GRD, 9 p.
- GUARRIGUE (N.), 1990 — *Place de l'arbre dans le paysage agricole : étude des jardins boisés du bassin versant de Petite rivière de Nippes (Haïti)*. Cnearc-Pratic, 86 p.
- JEAN (Y.), 1989 — La conservation de l'eau et des sols à la plaine d'Aquin (Haïti). *Conjonction*, 182, 13 p.
- KERMEL-TORRES (D.), ROCA (P.), 1990 — *Bilan prospectif d'une agriculture résiliente*. Orstom/CNRS-Ceget, 9 p.
- KOOHAFGAN (A. P.), LILIN (C.), 1987 — *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. Rome, FAO, 36 p.
- LILIN (C.), BROCHET (M.), SMOLIKOWSKI (B.), 1988 — *Rapport de mission*. Mission de coopération-Pratic, 12 p.
- Madian-Salagnac (collectif) — *Paysans, systèmes et crise*. T. III. La parcelle et l'animal. DAG-UAG/FAMV Damien, en préparation.
- MURRAY (C. F.), 1979 — *Terraces, trees and haïtian peasants : 25 years of erosion control in Haïti*. USAID, 109 p.
- ROOSE (E.), 1991 — *Haïti : volet lutte anti-érosive des projets PROJ et Pratic*. *Rapport de mission*. 8 p.
- SAINT-DIC (R.), 1981 — *Systèmes de tenure et lutte anti-érosive en Haïti*. Thèse Msc, univ. Laval (Canada), 81 p.
- SMOLIKOWSKI (B.), 1989 a — *Le bassin versant de Petite rivière de Nippes : les unités agro-écologiques*. Document du projet Pratic, 16 p.
- SMOLIKOWSKI (B.), 1989 b — « Quelle stratégie pour l'aménagement intégré en Haïti ? ». In : *Actes du colloque interrégional (Guadeloupe)*, Conseil général/Unesco, 14 p.
- SMOLIKOWSKI (B.), 1989 c — Aménagement des bassins versants en Haïti. Synthèse atelier. *Conjonction*, 182-183, 6 p.
- SMOLIKOWSKI (B.), 1991 — *Unités agro-écologique et fonctionnement des systèmes d'exploitation agricole : comment raisonner les aménagements à la parcelle ?* 9 p.
- SMOLIKOWSKI (B.), BROCHET (M.), ROOSE (E) — Une nouvelle approche de lutte antiérosive en Haïti. *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 327-351.

Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central

Philippe BLANCANEUX (1), Pedro Luiz DE FREITAS (2), Renato Fernando AMABILE (2) et Arminda DE CARVALHO (2)

(1) Orstom/Embrapa, SNLCS-CRGO, Goiânia, Brésil.

(2) Embrapa, SNLCS-CRGO, Goiânia, Brésil.

RÉSUMÉ

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.

Caractérisé par son climat (précipitations moyennes annuelles de 1 500 mm avec jusqu'à 180 jours de sécheresse continue), l'écosystème présente une grande variété de végétation et de sols, où prédominent les « latossolos » (45 % de la superficie), dans leur majorité argileux à très argileux, profonds, avec une forte capacité d'infiltration, une moyenne susceptibilité à l'érosion, une faible fertilité naturelle. Toutefois, après quelques années de culture, on constate une baisse de la productivité, spécialement lorsque ces sols sont travaillés de façon inappropriée.

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.

Les programmes de recherche entrepris en coopération entre l'Orstom et l'Embrapa/SNLCS-CRGO dans les cerrados du Brésil central sont étroitement liés aux systèmes culturels actuels et sont orientés vers une meilleure caractérisation des propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces sols. L'objectif est de proposer des pratiques culturelles 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 culturels : il maintient relativement bien l'état structural du sol et contrôle l'érosion ; il offre une forte porosité, une bonne distribution de la taille des pores et un bon drainage interne ; malgré une tendance au compactage, il favorise une forte 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'agro-toxiques, 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 du sol (profil culturel) 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. Elles sont réalisées grâce à différentes

techniques (micromorphologie, porosimétrie au mercure, etc.). Les résultats sont évalués en relation avec la productivité des cultures sous différents systèmes culturaux.

MOTS CLÉS : Cerrado — Latossolos — Compactage — État structural — Matière organique — Systèmes culturaux — Profil cultural — Semis direct — Érosion — Conservation.

ABSTRACT

THE "NO TILLAGE" SYSTEM AS CONSERVACIONIST PRACTICE IN SOIL OF CERRADOS OF CENTER-WESTERN REGION OF BRAZIL

Around 23 % of the Brazilian Territory is occupied by the ecosystem of "cerrados" (acid savannas). At least five millions hectares have potential for intensive mechanized agriculture, once overcome their physical and chemical limitations. Characterized by the climate (average annual precipitation of 1 500 mm with up to 180 days of continuous drought), the ecosystem presents a large diversity of vegetation and soils, predominating the "Latosols" (oxisols) in 45 % of its area, mainly clay and very clay, deep, with high infiltration capacity, moderate susceptibility to erosion and low natural fertility. However, after a few years of continuous cropping, these soils quickly lose their productive capacity, especially when inadequately managed.

The main reason for this reduction in productivity consists in the decrease of organic matter content and in the degradation of soil physical properties, mainly the structural condition, which results in compaction. These phenomena affect water and nutrient dynamics in the soil, as well as the development of root system, represented by the acceleration of erosive processes in these soils.

The research programs conducted in cooperation between Orstom and Embrapa/SNLCS-CRGO in cerrados of Center-Western region of Brazil are related with cultural systems and oriented for a better characterization of physical, chemical and biological properties of these soils. The objective is the recommendation of alternative practices as conservacionist solutions for maintaining and increasing crop yields, reducing tillage operations in order to avoid the excessive superficial pulverization of soils.

No tillage system (direct seeding on the mulch or crop residues, without soil mobilization), as a part of integrated agroecological systems, appears as an excellent way of controlling erosion and conserving soil under the unfavorable conditions of cerrados.

The viabilization of this new system depends on the adoption of associated alternative technologies, such as crop rotation and green manure management and is the subject of research works here divulged.

Once amended the chemical and physical deficiencies of the soils, the utilization of no tillage system presents many advantages in relation to other cultural systems, under the conditions present on cerrados area, such as: maintains the relative soil structural condition and controls erosion; shows high porosity, good pore size distribution and good internal drainage; gives a high biological activity and variety of soil fauna, which favors the deep incorporation of organic matter and root penetration, besides a tendency to compaction; minimizes the utilization of pesticides, fuel and fertilizers; and, shows that high income may be obtained for different cash crops as soybeans, corn, beans or rice, in the cerrados area.

These conclusions are obtained by the morpho-structural analyses of the soil (cultural profile) and comparisons between different tillage systems. The physical and chemical determinations done in relation to the morpho-structural characteristics of the soils enclose among others, structure, organic matter, biological activity, root system development and orientation, and porosity. They utilize different techniques, as micromorphology, Hg porosimetry, etc. All results are evaluated in relation to crop yields and profit under different cultural systems.

KEYWORDS : Cerrados — Latosols — Compaction — Structural condition — Organic matter — Cultural systems — Cultural profile — No tillage system — Erosion — Conservation.

RESUMO

O PLANTIO DIRETO COMO PRÁTICA DE CONSERVAÇÃO DOS SOLOS DOS CERRADOS DO BRASIL CENTRAL

Aproximadamente 23 % do território brasileiro é ocupado pelo ecossistema do Cerrado do qual pelo menos 50 x 10⁶ ha possuem potencialidade para agricultura mecanizada intensiva, desde que as limitações físicas e químicas sejam superadas.

Caracterizado pelo clima (precipitação anual média de 1 500 mm, com até 180 dias de seca contínua), o ecossistema apresenta grande diversidade de vegetação e de solos, predominando os Latossolos (45 % da área), em sua maioria argilosos e muito argilosos, profundos, com alta capacidade de infiltração, média susceptibilidade a erosão e baixa fertilidade natural. No entanto, após alguns anos de cultivo estes solos perdem rapidamente sua capacidade produtiva, especialmente quando manejados inadequadamente.

A razão principal da queda de produtividade consiste na diminuição do teor de matéria orgânica e uma degradação das propriedades físicas dos solos, principalmente da condição estrutural, o que provoca a compactação. Esses fenômenos afetam a dinâmica da água e dos nutrientes no solo, assim como o desenvolvimento do sistema radicular, que se traduzem pela aceleração dos processos erosivos destes solos.

Os programas de pesquisas iniciados em cooperação entre Orstom e Embrapa/SNLCS-CRCCO nos Cerrados do Brasil central, são estreitamente relacionados com os sistemas culturais atuais e são orientados para uma melhor caracterização das propriedades físicas, químicas e biológicas desses solos. O objetivo é propor práticas alternativas como soluções conservacionistas visando manter ou incrementar a produtividade das culturas, reduzindo ao mínimo as operações de preparo de modo a evitar a excessiva pulverização superficial do solo.

O plantio direto (plantio na palha ou resteva, sem mobilização do solo), como parte integrante de sistemas agroecológicos integrados, aparece como um excelente meio de controle da erosão e de conservação do solo sob as condições adversas do Cerrado.

A viabilização dessa nova técnica, que depende da adoção de tecnologias alternativas associadas, tais como a rotação de culturas e o manejo de adubos verdes, constitui atualmente objeto de pesquisas.

Uma vez corrigidas as deficiências químicas e físicas dos solos, o uso do plantio direto apresenta várias vantagens em relação aos outros sistemas culturais, sob condição do Cerrado : mantém relativamente a condição estrutural do solo e controla a erosão ; mostra alta porosidade e uma boa distribuição de tamanho de poros ; uma boa drenagem interna ; apesar de uma tendência à compactação, proporciona uma alta atividade biológica e variedade da fauna do solo que favorecem uma profunda incorporação da matéria orgânica e penetração das raízes ; minimiza o uso de agrotóxicos, combustível e adubos ; e, mostra que os rendimentos elevados podem ser obtidos para diferentes cultivos econômicos como soja, milho, feijão ou arroz, nos Cerrados do Brasil central.

Esses resultados são obtidos através da metodologia da análise morfo-estrutural do solo (perfil cultural) e por comparações entre diferentes sistemas de preparo. As determinações físico-químicas feitas em relação às características morfo-estruturais dos solos abrangem, entre outras, a estrutura, a matéria orgânica, a atividade biológica, o desenvolvimento e a orientação do sistema radicular e a porosidade. Elas são realizadas com diferentes técnicas (micromorfologia, porosimetria de mercúrio etc.). Os resultados são avaliados em relação à produtividade das culturas sob diferentes sistemas culturais.

PALAVRAS CHAVES : Cerrado — Latossolos — Compactação — Condição estrutural — Matéria orgânica — Sistemas culturais — Perfil cultural — Plantio direto — Erosão — Conservação.

INTRODUCTION

La demande croissante en aliments et en matières premières d'origine agro-sylvopastorale, tant interne qu'externe, a conduit le Brésil à accélérer le développement de ce secteur, non seulement par l'augmentation de la productivité, mais fondamentalement par l'expansion de sa surface agricole.

L'orientation de cette expansion vers les « cerrados » est favorisée par la conjoncture socio-économique et politique. Le développement économique du pays, allié à la croissance démographique, principalement des régions sud et sud-est, exige l'ouverture de zones de développement relativement proches des grands centres de consommation. La nécessité d'augmenter la participation des exportations pour compenser les coûts du développement industriel et

urbain contribue également à l'incorporation des cerrados à la production agropastorale. Le déplacement de la capitale fédérale et la création de Brasilia sur le plateau central ont été des facteurs significatifs dans la promotion et la consolidation du développement régional en question.

Les sols sous végétation de cerrados sont occupés approximativement par 39 % de pâturages naturels, 15 % de pâturages plantés, 8 % de cultures annuelles et pérennes et 38 % de végétation naturelle. L'occupation pleine, intensive et rationnelle de la région des cerrados peut fournir annuellement près de 150 millions de tonnes de grain, 9 millions de tonnes de viande et 300 millions de mètres cubes de bois, tout en maintenant 20 % de la surface pour la préservation de l'environnement et l'occupation par la population. En considérant la possibilité d'utiliser l'irrigation sur 10 millions d'hectares, le total produit pourrait

atteindre 190 millions de tonnes de grain (GOEDERT *et al.*, 1980 ; GOEDERT, 1989).

Afin que cette prévision devienne une réalité, il est nécessaire de créer, d'adapter et de valider des technologies qui garantissent des gains représentatifs d'efficacité des systèmes de production, principalement ceux qui sont liés à la gestion des sols et des eaux. Pour cela, on doit gérer l'application de techniques visant principalement à l'exploitation soutenue des ressources disponibles des cerrados. Le semis direct représente, pour ce biotope, une

alternative technique prometteuse pour le développement de systèmes agroécologiques intégrés.

CARACTÉRISATION DE LA RÉGION

La région des cerrados, avec 200 millions d'hectares, représente près de 23 % de la superficie du territoire national. Cette surface, distribuée de façon hétérogène et discontinue, s'étend principalement sur les régions centre-ouest, sud-est et nord-est du Brésil (fig. 1).

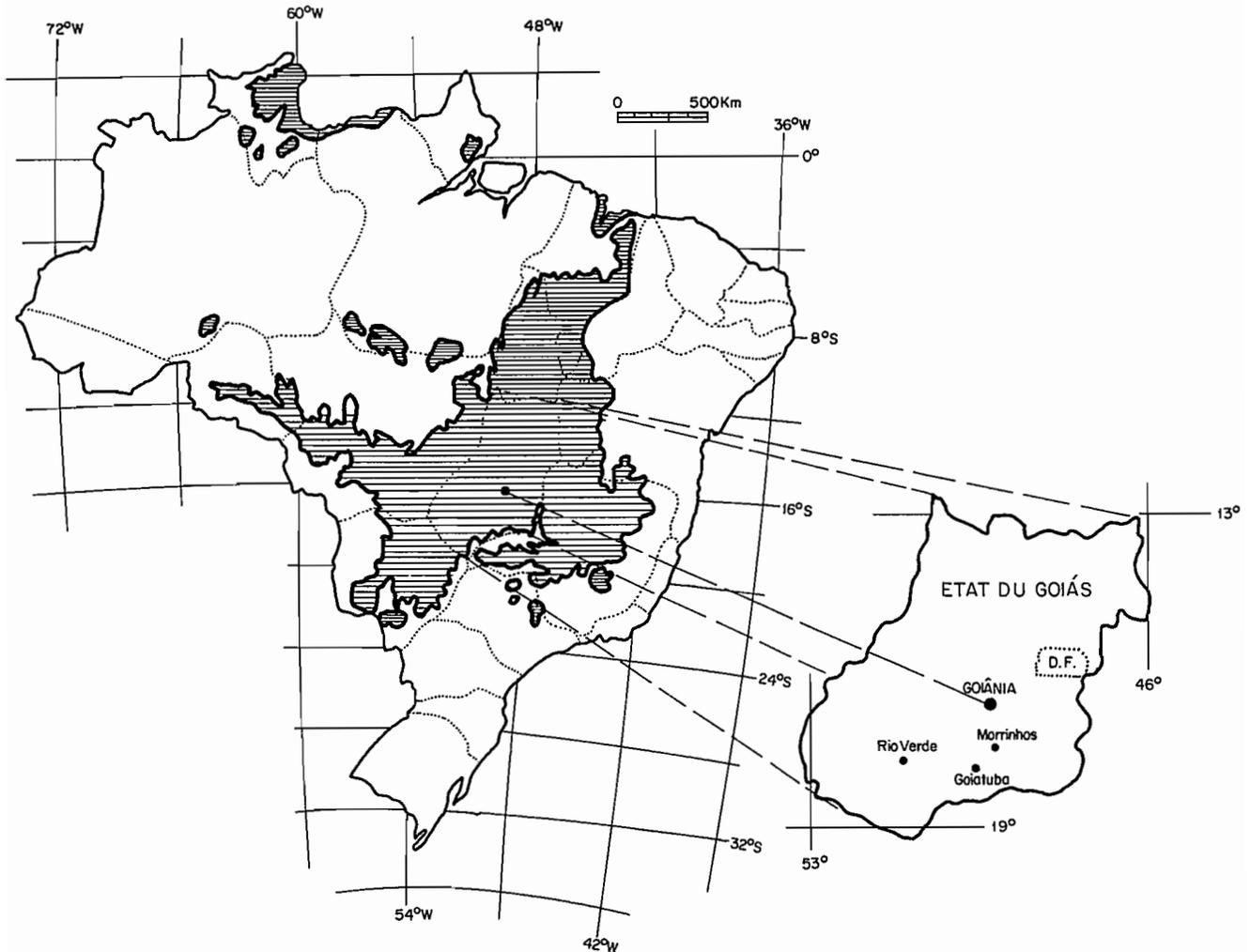


FIG. 1. — Localisation des cerrados au Brésil.
Localization of cerrados (acid savannas) areas in Brazil.

Des sept domaines morphoclimatiques et phytogéographiques brésiliens, les cerrados constituent, par leur position géographique, leur caractère floristique, celui de la faune et de leur géomorphologie, le point d'équilibre de domaines variés, puisqu'ils se connectent au travers de couloirs hydrographiques à ces derniers. Écologiquement,

ils sont rapportés aux savanes, constituant des configurations régionales de celles-ci (BIOMA CERRADO, 1991).

Malgré l'intense croissance, vérifiée dans la dernière décennie, liée au déplacement des populations vers l'intérieur du pays, la région présente encore une faible densité de population. L'industrialisation en est à ses balbutiements, mais son potentiel d'expansion est grand.

La pression anthropique tend à s'accroître grâce aux potentialités des cerrados, spécialement dans le Goiás. Cet État continue à recevoir un fort contingent de producteurs agricoles des régions sud et sud-est, à la recherche d'espaces plus grands, de terres moins chères et non dégradées, pour développer leurs activités agropastorales.

Climat

La majeure partie de la région possède un climat de type Aw de la classification de Köppen, bien que soient représentés, dans les zones plus élevées, les types climatiques Cwa et Cwb. La température moyenne annuelle varie de 26 °C à l'extrême nord à moins de 20 °C dans les « chapadas » du centre-sud. D'après ADAMOLI *et al.* (1986), près de 65 % de la surface des cerrados reçoit entre 1 200 et 1 800 mm de pluie et pour 80 % les précipitations sont comprises entre 1 000 et 2 000 mm annuels. Toutefois, cette distribution est concentrée durant les mois d'octobre à avril, caractérisant deux saisons bien définies, l'une sèche, l'autre pluvieuse (fig. 2). La période sèche peut durer quatre à sept mois sur environ 88 % de la surface, entraînant de sérieuses limitations pour l'agriculture, qui est réduite à la saison pluvieuse.

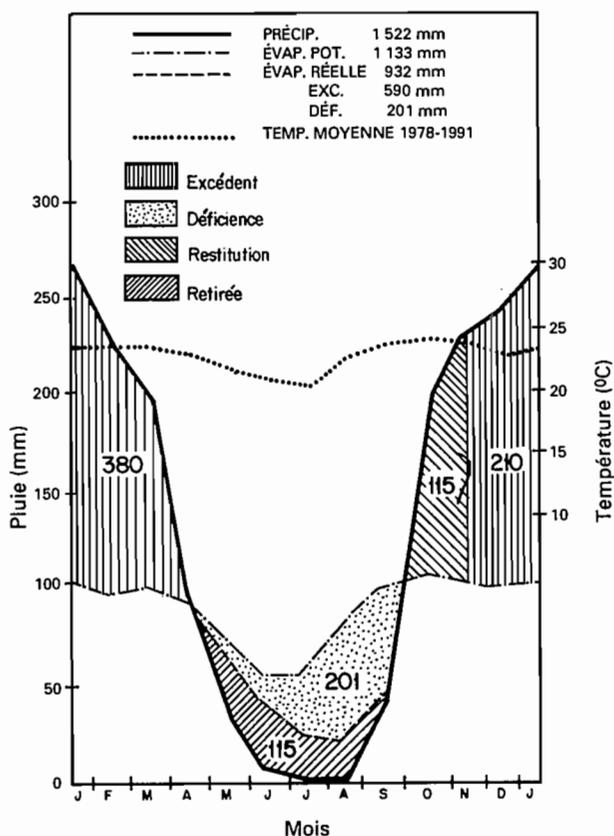


FIG. 2. — Bilan hydrique. Goiânia, période 1961-1971 (d'après THORNWAITE et MATHER, 1955).
Water balance for Goiânia, Brazil.

Une autre caractéristique marquante est l'existence de périodes à déficit pluviométrique, durant la saison pluvieuse, connues dans la région sous le nom de « verânicos ». En fonction de leur intensité et de leur durée, du stade de développement de la culture et de l'espèce cultivée, ce déficit peut causer de sévères réductions de productivité. D'après COCHRANE *et al.* (1988), plus de 60 % de la surface des cerrados est affectée par les verânicos dont la période de plus grande probabilité d'apparition va de fin décembre à la première décennie de février, lorsque les cultures sont déjà installées, l'interruption continue des pluies pouvant aller jusqu'à vingt jours.

Un autre facteur à considérer est l'intensité des pluies ; les précipitations peuvent dépasser 100 mm en 24 heures, contribuant dans la majorité des cas à un grand effet érosif.

Végétation

Les variations édaphiques et climatiques résultant de l'ample surface de distribution des cerrados déterminent une grande diversité dans la végétation de ce biotope. Du point de vue de la physiognomie, les cerrados constituent une savane plus ou moins dense, avec une couverture herbacée continue, une strate discontinue d'éléments arborés et arbustifs aux troncs et aux branches tordus, avec des écorces épaisses, sombres, et, chez de nombreuses espèces, de grandes feuilles scoriacées (KER *et al.*, 1992 ; BRAN-DAO, 1991 ; CRUZ *et al.*, 1979).

Les sols acides, de faible fertilité, et le climat saisonnier sont les facteurs déterminants de l'existence des divers écosystèmes des cerrados. Un exemple pourrait être la présence des savanes broussailleuses (*campos sujos*) sur les sols les plus pauvres, et de forêts arborées (*cerradões*) dans les zones plus fertiles (KER *et al.*, 1992 ; ADAMOLI *et al.*, 1986).

Géomorphologie et géologie

La région centre-ouest du Brésil est caractérisée par une grande diversité de formes géomorphologiques dérivant de l'hétérogénéité des matériaux et de l'intensité des facteurs morphoclimatiques qui y ont joué. Le processus d'évolution du paysage a donné lieu à un modelé constitué de diverses surfaces d'érosion distribuées en niveaux altimétriques distincts, qui correspondent à des grands compartiments ou unités géomorphologiques (BRASIL et ALVARENGA, 1989).

Les sous-unités « Plateau rabaissé de Goiânia » et « Plateau septentrional du bassin du Paraná », appartenant respectivement au « Plateau central goiânais » et aux « Plateaux et Chapadões (formes tabulaires) du bassin sédimentaire du Paraná », décrites par BRASIL (1983), sont celles qui concentrent la plus grande part de la production agricole des cerrados du Goiás.

Le « Plateau rabaissé de Goiânia », avec des altitudes variant de 650 à 850 m, présente des formes de dissection

tabulaires où le relief varie de doucement à fortement ondulé. Géologiquement, il est constitué par des couvertures détrito-latéritiques pléistocéniques, reposant sur des micaschistes et quartzites du groupe « Araxá », du précambrien.

Le « Plateau septentrional du bassin du Paraná », qui englobe des formes géomorphologiques assez diverses avec prédominance des formes tabulaires, comprend deux compartiments distincts : le premier, plus élevé (600 à 1 000 m), dont la lithologie se réfère à des couvertures détrito-latéritiques pleistocéniques, constituées par des sédiments non consolidés sablo-argileux et argileux ; le second, abaissé (350 à 650 m), dont la lithologie est constituée par une succession d'épanchements majoritairement basiques (basaltes toléitiques), souvent associés à des arénites, appartenant à la formation « Serra Geral », et au groupe « São Bento » du jurassique/crétacé.

Sols

Les sols ferrallitiques (oxisols ou *latossolos*) sont les sols les plus fréquents et les plus utilisés dans la région des cerrados, couvrant près de 46 % de la superficie totale et occupant les plateaux tabulaires et les zones de topographie plus ou moins ondulée (EMBRAPA/SNLCS, 1981).

Tout au long de leur processus de formation, ces sols ont connu une intense lixiviation des bases et de la silice, et donc une concentration en minéraux argileux du type 1 : 1, principalement en kaolinite et en oxydes de fer et d'aluminium. Ce sont des sols très altérés, avec une CEC faible, une acidité élevée, une forte capacité de fixation du phosphore, et en conséquence une faible fertilité naturelle (KER *et al.*, 1992 ; ADAMOLI *et al.*, 1986 ; MALAVOLTA et KLIEMANN, 1985).

Dans les zones non exploitées, ces sols ferrallitiques offrent des caractéristiques physiques favorables telles que la profondeur, la friabilité, la porosité élevée, une bonne aération et un bon drainage (LUCHIARI Jr *et al.*, 1986). Ces facteurs physiques, associés au relief plat ou doucement ondulé de la région, confèrent à ces sols une potentialité élevée pour une agriculture mécanisée intensive, une fois corrigées leurs déficiences chimiques. Toutefois, dès leur incorporation au processus productif apparaissent des modifications qui peuvent provoquer de sérieux problèmes de dégradation, lesquels s'accroissent avec une utilisation inadéquate, entraînant le compactage, une faible infiltration de l'eau, une densité élevée, et l'érosion de ces sols.

La caractérisation structurale et analytique de la couverture pédologique développée sur les sédiments tertiaires ou quaternaires du Brésil central (couverture détrito-latéritique), sous végétation de cerrado, a permis de distinguer deux grands domaines d'altération et de pédogenèse (BLANCANEUX *et al.*, 1991) : un domaine ferrallitique fortement altéré et riche en kaolinite (milieu ouvert et bien drainé) et un domaine ferrugineux et hydromorphe,

relativement confiné. Le domaine ferrallitique couvre la plus grande partie des versants et le sommet des collines, tandis que le domaine ferrugineux et hydromorphe occupe le tiers inférieur des versants, les bas de pente et les axes de drainage. Ces domaines sont constitués par un certain nombre de *systèmes pédologiques* qui présentent une distribution horizontale sur les versants. Les systèmes pédologiques les plus fréquemment associés et utilisés pour l'agriculture dans les paysages des cerrados du Brésil central sont caractérisés par les séquences sols ferrallitiques rouge sombre et rouge jaunâtre. L'étude des interactions entre le sol et les autres composantes du milieu physique met en évidence l'influence déterminante de la lithologie et de la topographie sur le développement vertical et latéral de ces systèmes pédologiques, et montre l'étroite relation qui existe entre la profondeur du sol et les variations de couleur et de minéralogie.

Le semis direct, analysé dans cette étude, pour les cultures développées sur les sols ferrallitiques rouges vise au maintien des bonnes caractéristiques physiques ainsi qu'à l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques altérées par une utilisation inadéquate de ces sols.

LE SEMIS DIRECT

Les systèmes agricoles conventionnels utilisés dans les cerrados compromettent la productivité des cultures installées dans cette région (GOEDERT et LOBATO, 1986). Cette réduction de capacité productive, causée principalement par l'emploi intensif et continu du même outil ou d'outils agricoles impropres pour les opérations de préparation du sol, est le résultat d'une diminution de la teneur en matière organique et de la dégradation des propriétés physico-hydrauliques des sols. La pulvérisation excessive des horizons superficiels et le tassement subsuperficiel, avec la réduction de la porosité totale et particulièrement de la macroporosité, la diminution de la capacité d'infiltration affectent la dynamique de l'eau et des nutriments, accélérant les processus érosifs de ces sols (HARROLD, 1984 ; VIEIRA et MUZZILLI, 1984 ; VIEIRA, 1985 ; CENTURION et DEMATÉ, 1992). DEDECEK *et al.* (1986) considèrent que la mauvaise préparation du sol, avec une utilisation répétée des pulvérisateurs lourds, constitue un sérieux facteur d'aggravation de l'érosion hydrique dans la région, provoquant des pertes de sol de 29,4 t/ha/an sous culture de maïs, 8,1 t/ha/an avec le soja et de 7,1 t/ha/an sous culture de riz dans un sol ferrallitique rouge de 2 % de pente. Ces mêmes auteurs observent une réduction de 90 % des pertes en terre sur un sol ferrallitique rouge sous couverture végétale, par rapport au même sol découvert, et une réduction de 33 % en relation avec le système conventionnel. Nos résultats (tabl. I) concernant les pertes en sol et l'écoulement superficiel sur le sol ferrallitique de Goiânia, avec

3% de pente, après deux années de mesures, montrent l'importance de la couverture végétale pour le contrôle de l'érosion hydrique, et confirment les résultats de DEDECEK *et al.* (1986).

TABLEAU I
Perte en sol et écoulement superficiel.
Sol ferrallitique rouge, argileux, fortement désaturé en B,
Goiânia. Période : décembre 1988 à mai 1990
Soil loss and runoff in a Red Clayey Oxisols of Goiânia, Brazil.
Period : December 1988 to May 1990

Traitement	Perte en sol (t/ha/an)	Écoulement superficiel (%)
Sol nu avec préparation conventionnelle*	56,0	28,9
Sol nu avec préparation par pulvérisateurs	50,3	32,4
Pâturage avec préparation conventionnelle	0,07	2,9
Soja avec préparation conventionnelle	3,5	11,7
Soja avec préparation par pulvérisateurs	3,9	10,9
Maïs avec préparation conventionnelle	1,4	8,4
Maïs avec préparation par pulvérisateurs	2,2	8,4

* Préparation conventionnelle : un traitement par charrue à disques et deux pulvérisations de nivellement.

Source : Embrapa/SNLCS-CRGO, Goiânia (résultats non publiés).

La capacité d'infiltration est également affectée par le système de préparation du sol (REZENDE *et al.*, 1992 ; SILVA *et al.*, 1991). STONER *et al.* (1991) ont vérifié une réduction très forte de la vitesse d'infiltration dans un sol ferrallitique rouge jaunâtre très argileux, laquelle après quatorze années de culture avec utilisation de pulvérisateurs passe de 44 mm/h sous végétation de cerrados à 6,3 mm/h. Le même sol, après six années de préparation avec des charrues à disques, montre une infiltration de 15 mm/h. La perméabilité et la porosité totale diminuent également à mesure que l'on recourt aux labours et aux pulvérisations. L'augmentation de la densité du sol est fonction du type de préparation ; elle est toujours plus forte dans les systèmes avec pulvérisation.

STONER *et al.* (1991) montrent l'augmentation de la résistance mécanique à la pénétration dans un sol ferrallitique rouge jaunâtre sous végétation de cerrados en comparant le même sol sous végétation naturelle et après quatorze années d'utilisation de pulvérisateurs à disques lourds (fig. 3).

Le manque de rentabilité économique des systèmes conventionnels, en plus de la dégradation des ressources na-

tuelles et de ses effets, a conduit à la recherche de techniques alternatives (SORRENSON et MONTOYA, 1989).

SÉGUY (1987) et SÉGUY *et al.* (1984), évaluant agronomiquement et techniquement les effets de plusieurs types de préparation d'un sol sous cerrado, concluent que le labour en sol humide, après trituration et préincorporation des résidus cultureux, est l'opération la plus efficace, en termes d'amélioration de la fertilité et de la conservation de l'eau.

Parmi les systèmes alternatifs, le semis direct sur les résidus de la culture antérieure est présenté comme une option pour la gestion des sols des cerrados. Associé à d'autres pratiques agroécologiques, comme l'introduction d'engrais verts, la rotation et la succession des cultures et le contrôle des parasites et des maladies, le semis direct deviendrait viable par le perfectionnement des technologies de fertilisation, chaulage et contrôle des mauvaises herbes, des variétés, ainsi que des systèmes de plantation et de couverture du sol (FREITAS et BLANCANEUX, 1991).

Dans plusieurs essais réalisés, le semis direct se présente comme une *technique de conservation efficace* pour réduire les pertes en sol dans la mesure où les résidus végétaux maintenus en surface absorbent l'énergie cinétique des gouttes de pluie et du ruissellement (FREITAS *et al.*, 1992).

AMABILE et RESCK (1990 a), étudiant l'effet de différents systèmes de préparation (semis direct, scarification, labour avec charrue à disques ou à socs) sur un sol ferrallitique rouge argileux sous cerrados, observent, la septième année, des comportements différents avec deux cultures introduites. Pour le soja, le semis direct est supérieur d'environ 25 % dans la production de grain, comparé à la préparation par charrue à disques. Pour le maïs, l'utilisation des disques donne une augmentation de 34 % environ par rapport au semis direct. Ces mêmes auteurs (AMABILE et RESCK, 1990 b), travaillant sur le même sol, notent une meilleure distribution des racines du soja et du maïs dans le traitement par semis direct en comparaison du traitement avec disques.

CENTURION et DEMATÉ (1992), comparant les effets de divers systèmes de préparation du sol (système conventionnel : pulvérisations après labour ; système inversé : labour après pulvérisations ; semis direct) sur la production de maïs dans un sol ferrallitique rouge argileux des cerrados, observent que le semis direct produit moins que les autres traitements.

ARDENGI (1989), travaillant sur un sol ferrallitique rouge non désaturé de la région des cerrados et cultivé en maïs depuis dix ans, n'observe pas de différence significative dans la production entre les parcelles en semis direct et celles traitées par charrue à disques ou à socs, bien que l'on constate des teneurs plus importantes en matière organique et en phosphore soluble dans les premiers

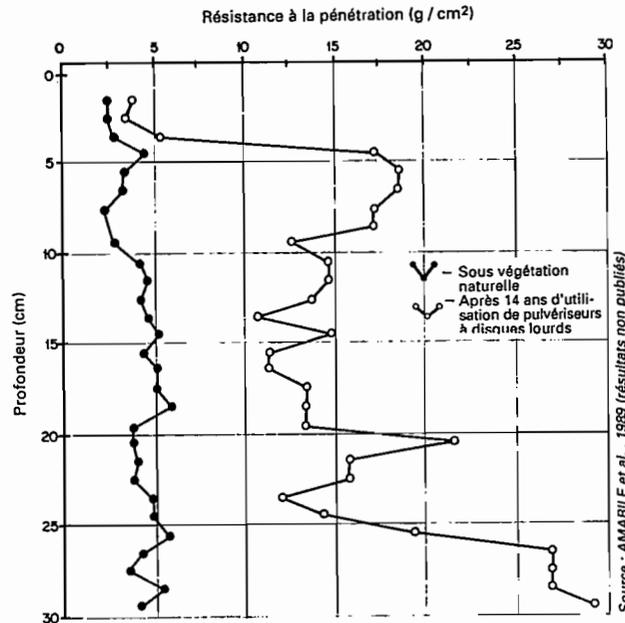


FIG. 3. — Résistance mécanique à la pénétration d'un sol ferrallitique rouge jaunâtre sous végétation de cerrado (*latossolo vermelho-amarelo*).
Mechanical resistance to penetration in a red-yellow oxisol under cerrados vegetation.

horizons ainsi qu'une plus forte porosité totale du sol sous semis direct.

SIDIRAS *et al.* (1984), en déterminant quelques paramètres physiques d'un sol ferrallitique non désaturé du sud du pays, sous semis direct et traitement conventionnel, obtiennent avec le semis direct une plus grande rétention en eau dans la couche superficielle et un plus faible gradient de densité du sol dans le profil, qu'ils justifient par la réduction de la macroporosité et l'augmentation de la teneur en matière organique de la couche superficielle.

En conclusion, d'après les différents travaux évoqués, l'influence du semis direct, par rapport aux autres systèmes de préparation, se traduit d'une façon générale par une amélioration des caractéristiques physiques du sol. Les résultats semblent plus contradictoires quant à la production, et différer selon les cultures (maïs, soja...).

Les connaissances techniques et scientifiques sur la viabilité du semis direct dans la région des cerrados sont encore insuffisantes. L'objectif de ce travail est de présenter les résultats des recherches développées en coopération entre l'Orstom et l'Embrapa/SNLCS-CRGO dans la région des cerrados du Centre-Ouest, afin d'évaluer les possibilités d'utiliser le semis direct comme pratique alternative visant à la conservation, à l'amélioration et (ou) au maintien de la capacité productive des sols par l'élimination des problèmes de dégradation de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Stratégie d'action

L'étude des systèmes alternatifs incluant le semis direct est réalisée dans deux sites expérimentaux. Le premier à la station expérimentale de l'Embrapa/SNLCS-Emgopa, à Senador Canedo, Goiânia ; le second à la Fazenda Quêrência das Antas, à Montividiu, Goiás.

SITE 1 : GOIÂNIA (RÉGION CENTRALE DE L'ÉTAT DU GOIÁS)

Cette expérimentation installée en 1989 vise à l'observation et à la comparaison de successions de cultures irriguées et de systèmes de préparation du sol, considérés comme conventionnels et alternatifs. Les systèmes de préparation retenus sont les suivants : pulvérisation (GP) ou « grade pesada », avec utilisation d'un pulvérisateur à disques autoporteur lourd, suivi de deux pulvérisations légères ; labour profond (AP) (charrue à disques, charrue à socs, et nivellement) ; semis direct (PD) sur les résidus de la culture antérieure avec une semeuse spécialement adaptée.

Les cultures étudiées sont le maïs (été, chaud et pluvieux) et le haricot (hiver, sec et froid).

Les successions de ces systèmes sont testées en parcelles de 40 m x 15 m sur un sol ferrallitique argileux rouge, sous pivot central avec « gicleurs » sous pression moyenne.

SITE 2 : MONTIVIDIU (RÉGION SUD-OUEST
DE L'ÉTAT DU GOIÁS)

L'expérimentation vise au test des systèmes agroécologiques alternatifs, avec comparaison de la préparation du sol et de la plantation sous cultures non irriguées (une culture par an). Les parcelles de démonstration (30 m x 600 m), sans répétitions, sont installées dans une aire cultivée, zone de pâturage à *Panicum maximum*, *Bracharia ruzizensis* et *Cajanus cajan*. Les traitements culturaux considérés sont les suivants : traitement conventionnel, c'est-à-dire préparation par charrue à disques suivie de deux pulvérisations (PC) ; semis direct (PD).

Les parcelles sont subdivisées pour différentes doses de fertilisants, d'herbicides, et les cultures introduites sont le maïs et le soja.

Méthodologies adoptées

SYSTÉMISATION ET ADAPTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DU PROFIL CULTURAL

Organisation macroscopique

La caractérisation de l'état structural des sols étudiés est réalisée à partir de la méthodologie adaptée du « profil cultural » de GAUTRONNEAU et MANICHON (1987). Cette méthodologie basée sur la caractérisation morphologique des différents volumes pédologiques reconnus au cours de l'examen des profils, tant verticalement que latéralement, s'appuie également sur un certain nombre de déterminations analytiques effectuées tant *in situ* qu'au laboratoire (BLANCANEUX *et al.*, 1991).

L'objectif de la description est la caractérisation morphostructurale et physico-hydrigue du sol, ainsi que de ses relations avec la couverture végétale et les opérations culturales. La description doit inclure principalement les observations sur l'état structural, la consistance et la porosité, en plus du développement et de l'orientation des racines. L'ensemble des résultats obtenus doit permettre la compréhension des diverses interventions agricoles antérieures à la description des profils, ainsi que du rôle des cultures antérieures, afin d'établir, entre autres, les *relations entre l'état structural et le développement racinaire*.

Organisation microscopique

La caractérisation microscopique est réalisée par l'observation à la loupe de mottes et de lames minces, et au microscope optique de ces dernières. Pour l'analyse micromorphologique, les lames étudiées correspondent à des échantillons non déformés de *volumes structuraux homogènes* identifiés lors de la description morphostructurale.

CARACTÉRISATION DE L'ESPACE PORAL

Les observations morphostructurales et microscopiques de l'espace poral sont complétées par la quantification de la porosité totale et de la distribution de la taille des pores, pour divers intervalles, en fonction des différents traitements culturaux. À cette fin sont déterminés les densités,

apparente et réelle, la rétention en eau à différentes pressions, ainsi que le spectre poral par la porosimétrie à mercure.

Densimétrie et porosité

Les déterminations sont réalisées sur des échantillons non remaniés, prélevés verticalement dans les horizons diagnostiqués, avec des cylindres volumétriques de 100 cm³. Après saturation, les échantillons sont soumis à des pressions de 6, 33 et 100 kPa, puis, après équilibre de chaque pression, la teneur en eau des échantillons est mesurée par gravimétrie et ces derniers sont légèrement réhumidifiés. Deux répétitions sont faites par horizon étudié. Les résultats sont rapportés à l'humidité volumétrique.

La densité apparente est déterminée dans les mêmes échantillons, après séchage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (EMBRAPA/SNLCS, 1979). La densité réelle est déterminée dans un ballon volumétrique avec l'alcool éthylique. Les densités sont exprimées en g/cm³.

La distribution de la taille des pores est réalisée sur la base du rayon équivalent à partir de la théorie des tubes capillaires pour les différentes pressions appliquées. Sont déterminés les pourcentages de micropores, dans les intervalles de 50-9 µm, 9-3 µm et < 3 µm, qui composent la microporosité, et > 50 µm, ou macroporosité (FREITAS, 1988), exprimés en pourcentage du volume total de l'échantillon.

Porosimétrie au mercure

L'étude du système poral par intrusion de mercure dans de petits échantillons de 2 à 4 cm³, séchés à l'étuve, permet d'évaluer la distribution de la taille des pores, en fonction du rayon équivalent, dans les intervalles de 0,004 à 80 µm (BRUAND, 1985, 1991). Les déterminations ont été réalisées au laboratoire de l'Orstom à Cayenne (Guyane française), avec utilisation du microporosimètre (Micrometrics Pore Sizer — Carlo Erba 2000). Les résultats sont exprimés par l'indice des vides *e* et du « spectre de vide », calculé sur la base de l'indice des vides et du logarithme du rayon équivalent (TESSIER, 1984).

Stabilité des agrégats

La détermination de la stabilité des agrégats permet l'évaluation de la résistance de ces derniers à leur humectation et aux forces de désintégration. Plus la stabilité des agrégats est faible dans l'eau, plus la susceptibilité du sol à la détérioration de sa structure par l'impact des gouttes d'eau ou par l'action des outils de préparation culturale du sol, ou son tassement par le passage des machines agricoles, sera grande.

La détermination de la stabilité des agrégats dans l'eau suit la méthodologie présentée par FREITAS et BLANCANEUX (1991, 1994), d'après KEMPER (1965). Les échantillons sont prélevés sous la forme de monolithes dans les horizons décrits lors de l'analyse morphostructurale. Au

laboratoire, les agrégats compris entre 4 et 8 mm sont soumis à une humidification par « brumisation » et tamisés dans l'eau grâce à un jeu de tamis de taille variant de 2 à 0,053 mm d'ouverture.

Caractérisation chimique (fertilité)

La méthodologie adoptée est la suivante :

- carbone organique : méthode volumétrique par le bichromate de potassium et titrage au sulfate ferreux (EMBRAPA/SNLCS, 1979) ;
- matière organique : à partir du carbone ($MO \% = C \% \times 1,724$) ;
- N total : par distillation Kjeldahl ;
- pH eau : par potentiométrie ;
- H + Al (acidité échangeable) : méthode volumétrique et titrage par la soude ;
- Ca + Mg échangeables par complexométrie et titrage par EDTA ;
- P assimilable : méthode colorimétrique par acide ascorbique ;
- K échangeable : méthode directe par photométrie de flamme ;
- Al échangeable : méthode volumétrique par titrage à la soude.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Organisation et constituants des sols étudiés

Les sols étudiés sont classés comme « *Latossolo vermelho-escuro* » correspondant aux sols ferrallitiques fortement désaturés de la classification française des sols et aux oxisols de la Soil Taxonomy, et sont caractéristiques des sols développés sur la couverture détrito-latéritique du quaternaire, sous végétation de cerrados, dans la région centrale du Brésil. Ils sont représentés par les profils de référence LSG0 (Goiânia) et T2.4 (Morrinhos).

Le profil de référence LSG0 décrit à Goiânia se situe à proximité des parcelles expérimentales PCG et se trouve sous jachère de graminées depuis environ cinq ans ; ce sol était antérieurement cultivé par traitement conventionnel (GP). Le profil T2.4 est localisé à Morrinhos (GO) et se trouve sous végétation naturelle (cerrado).

ORGANISATION MACROSCOPIQUE

Le profil LSG0 est caractérisé par les horizons Ap, AB, BA et BW. Les transitions entre les horizons sont graduelles ou diffuses. Il y a peu de variation de couleur, si ce n'est un léger brunissement dans les horizons superficiels plus riches en matière organique. Les sesquioxydes sous forme diffuse sont répartis dans tout le profil dont la texture est argileuse. La structure microagrégée en profondeur (« poudre de café ») se développe en agrégats polyédriques subanguleux, plus ou moins fragiles dans les horizons superficiels.

Dans son ensemble, ce sol présente une forte activité biologique, un enracinement profond, des propriétés physiques correctes dans les horizons profonds microagrégés, tandis qu'un tassement résultant vraisemblablement de l'activité agricole passée se manifeste dans les horizons subsuperficiels.

CONSTITUANTS DU SOL

Minéralogie

L'analyse aux rayons X de la fraction inférieure à 2 μ révèle la présence d'un peu de kaolinite désordonnée, d'interstratifié chlorite-vermiculite et (ou) vermiculite alumineuse, de traces d'illite altérée, de gibbsite et d'hématite assez importantes, d'un peu de goethite alumineuse et d'anatase, et ce pour tous les horizons du profil.

Analyse granulométrique

La détermination de la texture d'un sol ferrallitique microagrégé est une opération délicate et complexe, comme l'ont signalé de nombreux auteurs dont, entre autres, EL SWAIFY (1980) et CARVALHO (1990). L'argile associée au fer, organisée en microagrégats, n'est pas totalement dispersable dans l'eau. CHAUVEL *et al.* (1976) ont ainsi distingué trois degrés de mobilisation de l'argile dans un sol ferrallitique : argiles « libres », argiles « immobilisées » et argiles « cimentées ».

Texturalement (tabl. II), ce profil montre des taux d'argile qui varient de 51 % en Ap à 56 % en BW. Les taux en limons restent de l'ordre de 15 %. Les taux de sables fins ne varient pas dans le profil et sont de 24 %. Ceux de sables grossiers varient de 9 % dans les horizons Ap à 6 % en BW. On n'observe pas d'éléments grossiers.

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Le sol est acide à très acide dans tous les horizons (tabl. II) ; il possède une faible teneur en bases échangeables et un fort taux de désaturation. La somme des bases échangeables S qui est égale à 3,9 méq/100 g dans les horizons Ap tombe à 1,4 méq/100 g en ABp, pour atteindre 0,6 méq/100g en BW. On peut remarquer que, en BW, pH KCl > pH eau, ce qui traduit une charge nette positive dans cet horizon (capacité d'échange anionique supérieure à capacité d'échange cationique) et donc une mauvaise rétention des cations. Les taux en matière organique (C et N) sont significatifs seulement dans les horizons superficiels, tombant très rapidement à des valeurs de l'ordre de 0,3 % pour C et 0,04 % pour N dès les horizons de moyenne profondeur (60 cm). Les teneurs en Fe₂O₃ et Al₂O₃ (attaque à H₂SO₄ 1:1) sont élevées ; dans tous les horizons, la teneur en fer total est supérieure à 10 %, tandis que Al₂O₃ oscille autour de 21 %, ce qui confirme la grande richesse en sesquioxydes de ce sol. K_i (SiO₂/Al₂O₃) est de l'ordre de 0,6 tandis que K_r (SiO₂/R₂O₃) reste de l'ordre de 0,48.

TABLEAU II
Caractéristiques physiques et chimiques du profil LSG0
Physical and chemical characterization of profile LSG0

Horizon	Prof. (cm)	Composition granulométrique du sol (%)				
		Sable grossier (2-0,2 mm)	Sable fin (0,2-0,05 mm)	Limon (0,05-0,002 mm)	Argile (< 0,002 mm)	Argile dispersée dans l'eau
Ap1	0-9	9	24	16	51	28
Ap2	9-21	9	24	16	51	32
ABp	21-33	8	25	16	51	8
BA	33-62	7	25	14	54	0
Bw1	62-100	7	24	15	54	0
Bw2	100-138	6	24	15	55	0
Bw3	138-184	6	23	15	56	0

Horizon	Ph		Complexe absorbant (mécq/100 g)								
	Eau	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ⁺⁺⁺	H ⁺	T	V (%)
Ap1	5,5	4,5	2,4	0,8	0,64	0,05	3,9	0,1	5,5	9,5	41
AP2	5,4	4,3	2,7	0,3	0,23	0,04	3,3	0,1	5,2	8,6	38
ABp	4,9	4,2	0,8	0,5	0,11	0,03	1,4	0,1	4,3	5,8	24
BA	4,9	4,4	0,5	0,6	0,08	0,03	1,2	0,0	3,0	4,2	29
Bw1	5,4	5,3	0,8	0,03	0,03	0,03	0,9	0,0	1,5	2,4	38
Bw2	4,7	5,7	0,5	0,02	0,03	0,03	0,6	0,0	1,0	1,6	38
Bw3	5,0	5,7	0,5	0,02	0,03	0,03	0,6	0,0	0,8	1,4	43

Horizon	Sat., Al (%)	P (ppm)	C (%)	N (%)	Attaque par H ₂ SO ₄ (%)			
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Ap1	3	16	1,72	0,16	7,7	21,0	10,3	1,19
Ap2	3	10	1,44	0,13	7,8	20,6	10,4	1,24
ABp	7	1	1,08	0,10	7,8	21,0	10,2	1,23
BA	0	2	0,69	0,08	7,8	21,5	11,3	1,26
Bw1	0	1	0,37	0,05	7,9	21,5	10,5	1,26
Bw2	0	1	0,16	0,04	8,4	22,5	10,8	1,27
Bw3	0	1	0,37	0,03	7,9	21,7	11,5	1,30

CONCLUSION

Les caractéristiques morphostructurales et physico-chimiques du profil LSG0₀ montrent que ce sol est bien représentatif des sols développés sur les couvertures détrito-latéritiques argileuses rouges du quaternaire du plateau central brésilien sous végétation de cerrado. Ces sols sont caractérisés par une texture argileuse, une structure microagrégée (état de liaison argile/oxydes et sesquioxydes de fer et d'aluminium) des horizons de profondeur ; cette structure a tendance à s'effacer dans les horizons anthropisés pour faire place à des assemblages plus consistants donnant naissance à des horizons plus cohérents, plus ou moins tassés en fonction du travail du sol.

Chimiquement, ce sont des sols acides, pauvres en éléments nutritifs, très riches en oxydes et sesquioxydes, relativement dépourvus de matière organique lorsque leur couverture végétale naturelle est enlevée.

Effet des systèmes agricoles (altération des structures)

L'exploitation intensive et l'utilisation inadéquate d'outils agricoles à disques (pulvérisateurs lourds ou légers) affectent l'état structural des sols en causant une pulvérisation excessive de la terre et un tassement ou un compactage subsuperficiel, qui réduit la porosité, affecte la capacité d'infiltration de l'eau et provoque une chute significative de la capacité productive du sol.

Pour analyser les modifications structurales et les propriétés physico-hydriques des sols étudiés, une étude de l'espace poral est menée à différentes échelles et par des méthodes d'approche diverses.

CARACTÉRISATION MORPHOSTRUCTURALE

La caractérisation morphostructurale *in situ* permet les observations suivantes.

Site 1, Goiânia (Senador Canedo), profils PCG

Système cultural 1

Système conventionnel : *grade pesada* (été)/*grade pesada* (hiver) (GP/GP). Le profil PCG01 est caractérisé par la présence d'un horizon tassé entre 5 et 19 cm (Ap2). À la limite supérieure de cet horizon, il y a déviation horizontale du système racinaire du haricot. Cet horizon surmonte un horizon ABp (19-28 cm) encore riche en matière organique, à éléments polyédriques subanguleux ; le matériau est relativement moins compact et consistant que Ap2, mais toutefois plus cohérent que BA (28-41 cm). On note d'une manière générale une tendance nette à l'augmentation de la consistance, de la profondeur, où des fragments de matière organique sont encore observables à près de 60 cm, vers le sommet du profil. La tendance au tassement est maximale vers 6 cm de profondeur et semble être le résultat des deux opérations de pulvérisation du sol en surface.

Système cultural 2

« Labour profond (été)/labour profond (hiver) » (AP/AP). Le profil PCG07 montre une incorporation de matière organique humifiée et (ou) de résidus végétaux en voie de décomposition dans tous les horizons. La structure reste polyédrique subanguleuse et la tendance à la microagrégation croît avec la profondeur : on passe à une structure microagrégée (« poudre de café ») en BW. L'activité biologique est forte dans l'ensemble du profil (galeries de termites). Globalement, le profil montre donc une forte porosité interagréat.

Système cultural 3

« Labour profond (été)/semis direct (hiver) » (AP/PD). Le profil PCG08 montre au niveau de l'horizon Ap2/AB (4-25 cm) un mélange mécanique de l'horizon Ap1 avec les matériaux plus profonds de l'horizon BA. Des fragments de matière organique sont fréquents dans tous les horizons et la porosité reste forte dans tout le profil. Il apparaît donc que le semis direct effectué pour la culture d'hiver maintient les propriétés structurales héritées du traitement cultural d'été (labour profond, AP).

Système cultural 4

« Semis direct (été)/semis direct (hiver) » (PD/PD). Le profil PCG12, représentatif de ce système, montre une tendance à la déviation horizontale des racines à la limite supérieure de l'horizon Ap2 peu tassé. On observe en effet dans cet horizon, ainsi que dans AB, la présence de macropores tubulaires, de galeries racinaires localisées et d'une activité biologique (termites). Les racines qui pénètrent en profondeur dans cet horizon ont tendance à contourner les grosses mottes (20 cm de diamètre) plus consistantes, et globalement l'horizon reste encore relativement poreux.

Conclusion

L'observation macroscopique des différents profils pédologiques anthropisés, soumis à des combinaisons de traitements culturaux différents et sous irrigation, montre :

— une tendance à un tassement des horizons Ap2, plus particulièrement observable lors de la répétition des traitements GP ;

— l'influence assez nette du traitement antérieur (été) qui semble conditionner l'organisation structurale du sol même après le traitement d'hiver ; cela est particulièrement observable en PCG08 (AP/PD) dans l'horizon Ap2/AB ;

— que le semis direct offre une forte activité biologique, responsable pour une très grande part de la macroporosité du sol (galeries, cavités...) et du maintien d'un stock organique relativement important dans le sol ;

— que les sols sous semis direct sont en hiver (saison froide et sèche) relativement plus humides que leurs voisins sous traitement conventionnel (rôle de la paille en surface dans l'évaporation).

Site 2, Montividiu (Fazenda Querência das Antas), profils ATM

Les principaux résultats comparatifs des systèmes de préparation du sol par semis direct et traitement conventionnel, pour les cultures pluviales de maïs et de soja, sont présentés dans le tableau III.

En conclusion, l'observation des sols sous semis direct, tant pour le maïs que pour le soja, montre le développement d'une structure fragmentaire nette et généralisée dans l'ensemble des profils. Elle se caractérise par l'existence d'agrégats subarrondis, d'une macroporosité importante, d'un enracinement profond, et l'absence d'indice de déviation du système racinaire ; par ailleurs, il est observé un important stock de matière organique et son incorporation en profondeur (plus de 2 % en dessous de 60 cm) par une très forte activité biologique dont les principaux constituants sont mentionnés dans le tableau III.

Les profils ATM1 et ATM2 se montrent très poreux et, bien qu'une légère augmentation de la cohésion se manifeste vers 20 cm de profondeur, ces sols apparaissent bien aérés, bien structurés, riches en matière organique et *légèrement humides* dans tous les horizons.

Sous traitement conventionnel, tant pour ATM3 (maïs) que ATM4 (soja), une tendance à la déviation du système racinaire est observée dans les horizons Ap2 et AB ; l'enracinement reste toutefois profond dans les profils qui sont poreux. La matière organique organisée et (ou) humifiée est encore observée à plus de 60 cm de profondeur, mais globalement l'activité biologique développée au sein de ces profils est nettement moins forte que dans le cas du semis direct. Par ailleurs, ces profils, tant pour le maïs que pour le soja, montrent des horizons relativement secs.

TABLEAU III
Caractérisation morphostructurale des profils ATM (site 2, Montividiu) : comparaison des systèmes de culture
Morpho-structural characterization of ATM profiles (site 2, Montividiu). Cultural systems comparison

Expérience : Agrotrop, Montividiu. Comparaison de systèmes de culture				
Cultures : Maïs et soja				
Sol : Ferrallitique, typique, modal, rouge, très argileux (60-65 % argile)				
PROFIL	ATM ₁ _____	ATM ₂ _____	ATM ₃ _____	ATM ₄ _____
Traitement	Semis direct	Semis direct	Conventionnel	Conventionnel
Séquence d'horizon	Ap ₁ /ABp/BA/Bw	Ap ₁ /ABp/BA/Bw	Ap ₁ /Ap ₂ /BA/Bw	Ap ₁ /Ap ₂ /AB/BA/Bw
Profondeur Ap/ABp	17 cm	33 cm	19 cm	28 cm
Prof. couleur brune	17 cm	33 cm	19 cm	20 cm
Couverture du sol	déchets organiques en décomposition (<i>Panicum maximum</i> et <i>C. cajan</i>)	déchets organiques en décomposition (<i>Panicum maximum</i> et <i>C. cajan</i>)	fragments de <i>Brachiaria</i> sp. en décomposition	déchets organiques peu décomposés
Taches	dans BA/Bw ; incorpor. de mat. org. par act. biol.	dans ABp/BA/Bw ; incorpor. de mat. org. par act. biol.	dans BA ; incorpor. de mat. org. par act. biol.	dans BA ; incorpor. de mat. org. par act. biol.
Matière organique	Ap : d.d. ; organisée et humifiée ; très abondante (3-4 %) ABp/BA : d.d. ; organisée et humifiée ; abondante (~ 2,5 %) Bw : d.d. ; organisée (carbonisée) et humifiée (commune) (< 2,0 %)	d.d. ; organisée (carbonisée) et humifiée très abondante (3-4 %) d.d. ; organisée (carbonisée) et humifiée abondante (2,7 %) d.d. ; organisée (carbonisée) et humifiée commune (< 2,2 %)	d.d. ; organisée et humifiée très abondante (~ 3,5 %) d.d. ; organisée et humifiée abondante (2,4 %) d.d. ; organisée et humifiée commune (2,2 %)	d.d. ; organisée et humifiée très abondante (~ 3,2 %) d.d. ; organisée et humifiée abondante (2,4 %) d.d. ; organisée et humifiée commune (< 2,3 %)
État structural	Ap : grumelleuse et polyédrique fine ABp/BA : polyédrique subanguleuse moyenne et fine Bw : polyédrique moyenne et fine à sous-structure microagrégée	grumelleuse et polyédrique fine polyédrique subanguleuse moyenne et fine polyédrique moyenne et fine à sous-structure microagrégée	polyédrique subanguleuse moy. et forte polyédrique subanguleuse moyenne et fine à sous-structure microagrégée	polyédrique subanguleuse fine et moyenne polyédrique subanguleuse moy. à forte polyédrique subanguleuse moy. et fine à sous-structure microagrégée
Porosité	très poreux ; pores fins, moyens et larges, intra-et inter-agrégats ; tubulaires d'act. biologique	très poreux ; pores fins, moyens et larges, intra-et inter-agrégats ; tubulaires d'act. biologique	très poreux dans l'ensemble du profil ; pores fins et moyens	très poreux dans l'ensemble du profil ; pores fins et moyens
Consistance	ABp : semi-rigide ; meuble, très friable, plast., collant BA : idem ; légèrement plus cohérent que ABp	semi-rigide ; meuble, très friable, plast., collant idem	semi-rigide ; très friable, très plast., très collant idem	semi-rigide ; friable, plast., coll. idem
Racines	Ap ₁ : très nombreuses ; fines, moyennes (concentrées dans les lignes de semis) ABp/BA/Bw : communes ; fines et moyennes, verticales	très nombreuses ; fines, moyennes ; relativement concentrées dans l'horizon communes ; fines et moyennes ; verticales	nombreuses ; fines et moyennes ; verticales et obliques communes ; fines et très fines ; ramifiées	nombreuses ; fines et moyennes ; concentrées entre 0 et 5 cm ; horizontales communes ; fines, sans direction préférentielle
Activité biologique	très forte en Ap ₁ et Abp, forte dans BA et Bw faune : insectes divers, larves de coléoptères (<i>Euethoia</i> sp. et <i>Dyscinetus</i> sp.), <i>Gryllus assimilis</i> , <i>Gryllotalpa hexadactyla</i> et dermaptères (<i>Doru lineare</i>)	forte dans tous les horizons arthropodes divers, chilopodes (mille-pattes) et diplopodes (« peau de serpent » - <i>Gymnostreptus olivaceus</i>)	forte dans les horizons idem ATM ₁	forte dans tous les horizons idem ATM ₂
Observations	tassement : non observé enracinement : profond ; concentration de racines dans les lignes de semis déviations des racines : non observée	légèrement plus cohérent en ABp profond non observée	léger tassement observé en BA qu'apparaît plus ferme et cohérent que les horizons de ATM ₁ et 2 profond peu nette ; horizont. non généralisée ; dans Ap ₂	léger tassement observé en ABp/BA concentré en Ap ₁ ; manteau de racines en surface ; forte nodulation non observée
Transition entre les horizons	grad. et plane : Ap ₁ /ABp dist. et plane : ABp/BA/Bw	diffuse et plane : Ap ₁ /ABp grad. et plane : ABp/BA/Bw	nette et plane : Ap ₁ /Ap ₂ grad. et plane : Ap ₂ /ABp/BA/Bw	nette et plane : Ap ₁ /Ap ₂ dist. et plane : Ap ₂ /ABp/BA/Bw

ORGANISATION MICROSCOPIQUE (cf. photos p. VI)

Profils de référence LSG0 et T2.4

L'observation à la loupe de prélèvements de mottes effectués dans les horizons profonds montre des agrégats de fer-argile bien individualisés, avec une forme subarrondie et une taille comprise entre 150 et 200 μ .

Pour l'ensemble du profil LSG₀, le squelette est également réparti et représente environ 20% du volume total. Il est constitué essentiellement de grains de sable quartzeux, fins et grossiers, de rares nodules ferrugineux et de fragments millimétriques de mica, isolés au sein d'une phase plasmique selon une distribution de type porphyrosquellique (BREWER, 1964).

La phase plasmique est organisée en éléments structuraux subarrondis, les microagrégats, de couleur rouge jaunâtre à rouge sombre en lumière naturelle, avec une orientation de type asépique. Nous n'avons pas observé de traits pédologiques. La principale variation observée concerne l'assemblage des microagrégats et donc la porosité qui en résulte.

On distingue globalement dans le profil LSG₀, et ce en accord avec les observations macroscopiques, deux « compartiments » distincts au plan de leur organisation.

Le « compartiment inférieur », de 62 à 184 cm de profondeur, se caractérise par une organisation du plasma en agrégats subarrondis, et par la présence d'une forte macroporosité interagrégat, notamment sous la forme de *chenaux/cavités*. Ces derniers, de forme allongée, constituent une porosité continue en reliant des *chambres* et des *vésicules* (BULLOCK *et al.*, 1985). En section transversale, ces chenaux révèlent des formes ovoïdes et se montrent fréquemment remplis de petits agrégats, de *pelotes fécales* et de petits grains de quartz, ce qui témoigne d'une forte activité biologique au sein du matériau (termites). Les parois de ces pores sont constituées par des assemblages plus denses d'agrégats dont les faces externes sont parfois recouvertes de films organiques.

En résumé, l'arrangement des microagrégats dans les horizons BW engendre une porosité interagrégat continue, irrégulière et polyconcave qui occupe une partie importante du volume du sol étudié.

Le « compartiment supérieur », de 0 à 62 cm, englobe les horizons anthropisés. Il présente une organisation de la phase plasmique relativement plus dense que celle qui a été décrite précédemment.

La couleur rougeâtre à jaune rougeâtre et la forme dominante des microagrégats restent les mêmes (subarrondie), mais de nouvelles formes (agrégats subanguleux) apparaissent et ces agrégats sont plus proches les uns des autres, tassés ; ils ont tendance à s'agglomérer pour constituer des « paquets » de plasma. Il en résulte une porosité nettement plus faible ; les pores interagrégats sont plus petits et nettement polyconcaves. Les surfaces et les con-

nexions entre les pores sont réduites de manière significative par rapport aux horizons de profondeur BW. On n'observe pas ou très peu de chenaux/cavités. Il demeure toutefois une macroporosité racinaire et d'activité biologique, mais globalement moins importante que dans les horizons profonds.

En conclusion, l'analyse microscopique a montré que l'unité d'assemblage élémentaire de ce sol est le microagrégat, de forme subarrondie et d'environ 200 μ de diamètre. Ces microagrégats présentent un squelette uniformément réparti dans tout le profil. La taille et la forme des pores sont conditionnées par le type d'organisation des microagrégats ; dans les horizons superficiels, le tassement de ces derniers réduit de façon significative les connexions et les volumes entre ces pores qui apparaissent plus isolés au sein d'une phase plasmique plus dense. Les chenaux/cavités sont beaucoup mieux représentés dans le compartiment inférieur du profil qui n'est pas ou n'a pas été directement soumis à l'action des outils agricoles.

On en déduit que, malgré l'absence de travail du sol durant les cinq dernières années, celui-ci apparaît relativement tassé dans ses horizons supérieurs, conséquence de l'activité agricole passée (système conventionnel avec pulvérisateur lourd). L'inexistence de végétation arborée jusqu'à aujourd'hui n'aura pas permis à ce sol de reconstituer son organisation structurale telle qu'elle existe sous végétation naturelle de cerrado.

En effet, si on compare l'organisation superficielle et subsuperficielle de LSG₀ avec celle du profil T2.4 situé sous végétation arborée de cerrado, on observe dans ce dernier sol une organisation en microagrégats nettement arrondis, beaucoup plus « libres » (structure lâche), qui engendre une porosité beaucoup plus importante. On y observe également de très nombreux chenaux/cavités remplis de débris organiques et de microagrégats arrondis qui rendent compte de la très forte activité biologique jusque dans les horizons de profondeur.

Profils PCG (Goiânia, Senador Canedo)

PCG01 : GP/GP (système conventionnel, répétition des opérations en été et en hiver)

L'examen des lames correspondant aux horizons Ap2/ABp (6-19 cm) montre que le squelette est constitué de grains de sables quartzeux millimétriques. L'assemblage est porphyrosquellique. La phase plasmique est très dense, continue, de couleur rougeâtre en lumière naturelle. Les microagrégats sont tassés. Il en résulte une porosité relativement faible ; les pores paraissent isolés, polyconcaves, avec des surfaces et des connexions réduites. Il y a peu ou pas de chenaux/cavités. On observe de très nombreux petits fragments (1/10 mm) de matière organique noirâtre dans toute la lame. Quelques fissures liées au compactage apparaissent dans la phase plasmique. L'orientation est asépique.

En conclusion, l'organisation en microagrégats arrondis n'apparaît que localement dans le bas de la lame, au niveau de la transition entre Ap2 compacté et ABp relativement moins tassé. Le tassement entre les microagrégats réduit le volume et les connexions entre les pores ; on n'observe pas de chenaux/cavités. Le matériau est dense, tassé, compacté.

PCG07 : AP/AP (labour profond, répétition des traitements, charrue à disques et charrue à socs en été et en hiver)

L'examen de la lame correspondant à l'horizon ABp montre localement quelques assemblages plus denses et relativement tassés. Dans son ensemble, le matériau offre une microstructure relativement lâche et aérée. Les microagrégats sont subarrondis, la macroporosité est forte. De nombreuses galeries de racines et une forte activité biologique sont constatées.

PCG08 : AP/PD (succession des traitements labour profond en été et semis direct en hiver)

L'examen de la lame correspondant à l'horizon ABp (4-25 cm) montre que dans l'ensemble le matériau reste relativement poreux avec une structure microagrégée. Toutefois, par comparaison avec l'horizon plus profond, la microstructure paraît plus dense et le matériau relativement moins aéré que dans cette dernière lame. On observe ici une activité biologique forte qui conduit à l'existence d'une porosité tubulaire, localisée, avec des galeries racinaires remplies de débris organiques. La variation structurale observée serait le résultat du mélange mécanique des matériaux lors du labour profond.

En conclusion, l'observation montre une tendance au tassement vers la partie supérieure du profil. La phase plasmique de ABp est en effet relativement plus dense que celle de BA.

PCG12 : PD/PD (semis direct en été et semis direct en hiver)

À l'œil nu, l'examen de la lame correspondant à l'horizon ABp (16-24 cm) montre un réseau de fissures en étoile qui fait penser à une « *crack structure* ». On observe par ailleurs des plages relativement étendues de « paquets » de plasma rouge sombre résultant de l'agglomération d'agrégats ; le tout offre un aspect désordonné de plages denses séparées par de larges fissures.

Au microscope, le squelette se montre constitué de quartz fins, parfois revêtus d'argile, avec de rares nodules ferrugineux. La phase plasmique présente :

— de gros paquets de microagrégats accolés, avec une macroporosité relativement réduite ;

— des microagrégats subarrondis de taille très nettement supérieure aux microagrégats de PCG12, horizon BA ; ces agrégats ont eux-mêmes tendance à se regrouper localement pour constituer des plages denses et continues de matériau argilo-ferreux englobant des quartz et des petits fragments de matière organique organisée.

Au sein des plages denses de plasma, la porosité est réduite, mais on note la présence de gros pores fissuraux polyconcaves.

Au sein du matériau microagrégé, la structure paraît plus lâche ; les microagrégats ont une taille de l'ordre de 0,2 mm ; ils sont subarrondis ou subangulaires et tendent à se regrouper localement pour constituer des assemblages relativement plus denses. On observe des chenaux/cavités remplis de microagrégats et de petits éléments structuraux subarrondis (boulettes fécales), qui rendent compte d'une forte activité biologique à ce niveau.

L'horizon présente donc une porosité qui varie localement. L'activité biologique engendre une macroporosité tubulaire qui occupe un volume important dans cet horizon.

L'examen de la lame correspondant à l'horizon BA/BW1 (31-60 cm) montre un squelette identique à celui de la lame précédente. La phase plasmique, par contre, montre des microagrégats plus petits, apparemment plus arrondis et surtout moins tassés que dans le cas précédent. Le matériau apparaît plus aéré et avec davantage de connexions entre les pores. L'activité biologique est encore bien visible à ce niveau.

Conclusion sur l'examen des lames minces de PCG

Le traitement GP/GP montre au niveau de l'horizon Ap2/ABp un matériau compacté, à microagrégats tassés, à porosité très réduite, avec une phase plasmique très dense.

Le traitement AP/AP montre pour le même horizon une phase plasmique encore dense, mais avec un tassement moindre que le précédent. Les microagrégats sont plus arrondis. La porosité y est relativement plus forte, de larges pores racinaires et fissuraux ainsi que des chenaux/cavités sont présents.

Le traitement AP/PD dans l'horizon subsuperficiel Ap2 se montre relativement poreux dans certaines plages, avec localement existence de plages plus denses ; ce qui serait le résultat du mélange d'horizons par action mécanique. Dans l'horizon BA, le matériau est moins tassé et plus poreux ; mais on observe également à ce niveau l'influence du mélange mécanique des horizons qui engendre une variabilité structurale.

En ce qui concerne le traitement PD/PD, de gros paquets de microagrégats accolés sont des indices de tassement assez nets. On observe toutefois une très forte activité biologique responsable d'une macroporosité tubulaire importante, tant dans l'horizon AB que dans BA, avec une augmentation de la microagrégation en profondeur et donc de la porosité interagrégat qui en résulte.

Caractérisation de l'espace poral

DENSIMÉTRIE ET POROSITÉ

Les résultats obtenus pour la densité apparente, le volume de solides et la distribution de la taille des pores pour

différents intervalles sont présentés dans les figures 4 (site 1, Goiânia) et 5 (site 2, Montividiu).

Dans les deux sites, nous avons observé une variation

assez importante de la densité apparente dans tous les profils étudiés, en fonction des différents horizons, ce qui confirme les observations morphostructurales réalisées.

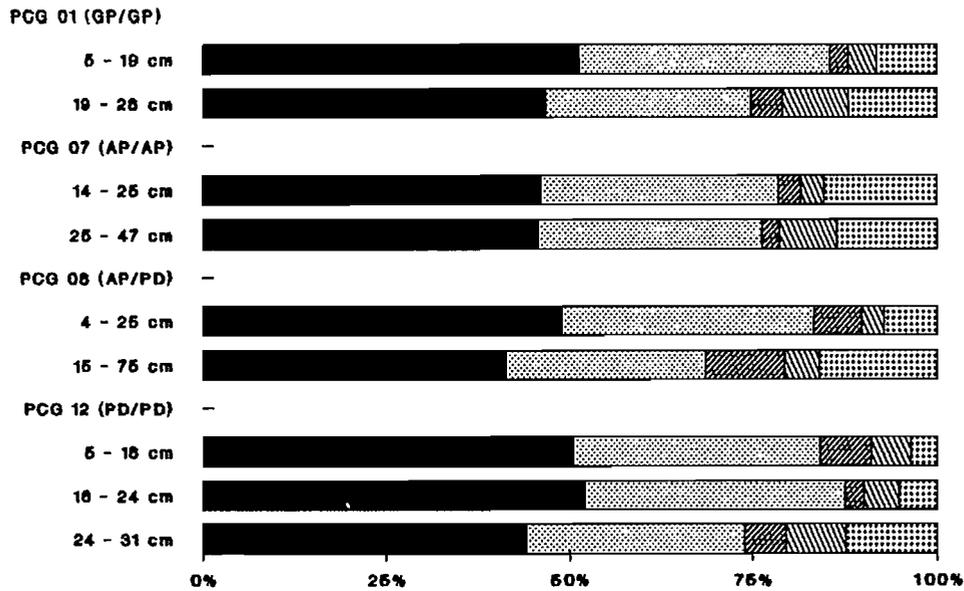


FIG. 4. — Distribution des volumes des différents constituants du sol pour divers systèmes culturaux (site 1, Goiânia).
Volume distribution of the different components of the soil under different cultural systems (site 1, Goiânia).

La figure 4 montre la distribution du volume de solides et de vides au site 1 (Goiânia). Les différences de volume des vides observées antérieurement sont ainsi présentées pour les différents intervalles de taille équivalente des pores en μm .

La principale preuve du compactage des couches observées, pour pratiquement tous les traitements, est une diminution significative du volume des macropores

(> 50 μm) et des micropores, principalement compris entre 3 et 9 μm et de 9 à 50 μm , responsables, respectivement, des mouvements de l'eau et de sa disponibilité. Le volume des pores en dessous de 3 μm (retenus au-dessus de 100 kPa) montre une variation sensiblement moindre. Ainsi, le tassement du sol provoque une diminution significative de la porosité entre (inter) et dans (intra) les agrégats polyédriques, confirmée par la porosimétrie au mercure.

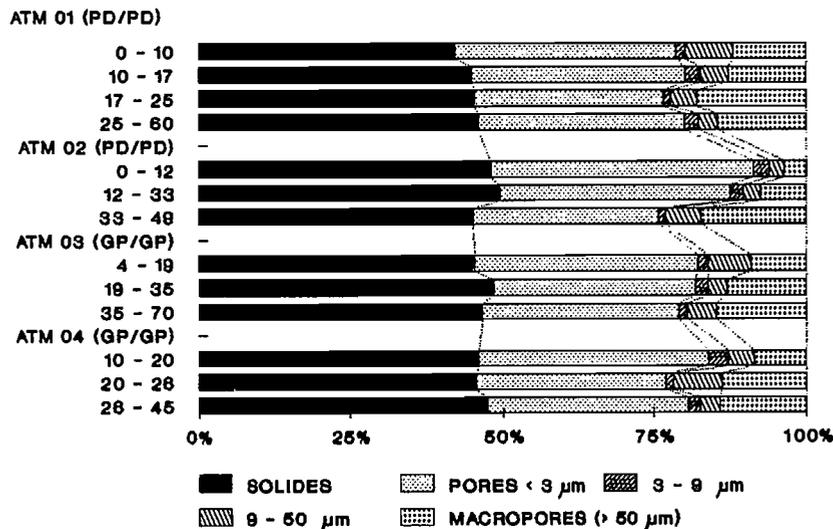


FIG. 5. — Distribution des volumes des différents constituants du sol pour divers systèmes culturaux (site 2, Montividiu).
Volume distribution of the different components of the soil under different cultural systems (site 2, Montividiu).

La figure 5 montre la même distribution pour le site 2 (Montividiu). Dans ce cas, l'effet majeur apparu non à cause du système cultural appliqué, mais de la culture, est confirmé par la différence significative de macroporosité ($> 50 \mu\text{m}$) existant entre les traitements ATM1 (PD, maïs) et ATM2 (PD, soja) et, en moindre proportion, entre ATM3 (système conventionnel, PC, maïs) et ATM4 (PC, soja). En comparant les traitements sous culture de maïs, il apparaît que *le semis direct est celui qui offre la meilleure distribution des pores dans tous les horizons*.

POROSIMÉTRIE AU MERCURE

Le spectre de porosité obtenu pour les horizons Ap2 (5-19 cm) et Bw (28-60 cm) du profil PCG1 (GP/GP) et l'horizon ABp (16-24 cm) du profil PCG12 (PD/PD) est présenté dans la figure 6 ; il montre une diminution du volume poral des horizons superficiels par rapport à l'horizon profond (Bw/PCG12).

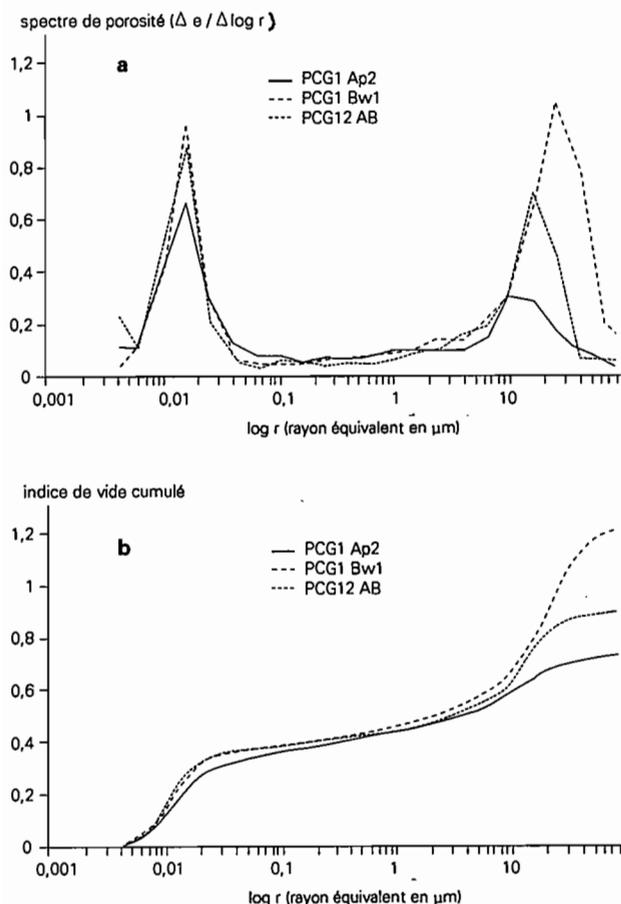


FIG. 6. — Courbes du spectre de porosité dérivé (a) et d'indice de vide cumulé (b) pour les horizons de deux traitements du site 1 (Goiânia).

Curves of the derivative porosity spectra (a) and accumulated void space index (b) for horizons of two treatments in site 1 (Goiânia).

Les courbes de distribution relative montrent une distribution bimodale de la porosité. En considérant les études morphologiques et les études antérieures réalisées dans des sols ferrallitiques (BRUAND, 1985, 1991 ; CHAUVEL *et al.*, 1991 ; KERTZMAN, 1989), il est possible de distinguer deux familles de pores : la première, dans l'intervalle de 0,006 à 0,03 μm , qui correspond aux pores situés dans les microagrégats (intra-microagrégats), et la seconde, constituée par les pores entre les microagrégats (inter-microagrégats) et intra-agrégats en considérant une macrostructure polyédrique subanguleuse. La porosité modale de cette seconde famille de pores varie avec l'horizon et le traitement étudiés, et est de 10 μm pour Ap2/PCG1, 20 μm pour ABp/PCG12 et 40 μm pour Bw/PCG1, en accord avec la structure de l'horizon. On observe une réduction significative du volume des pores de cette famille, quand on compare l'horizon profond (Bw) avec les horizons superficiels tassés, principalement pour Ap2/PCG1.

La réduction de la porosité dans l'intervalle étudié est visualisée dans la figure 6 b. Dans l'horizon ABp/PCG12, il y a une réduction de 25 % ($e_i = 0,91$) par rapport à l'horizon profond ($e_i = 1,22$), tandis que dans l'horizon Ap2/PCG12 la réduction est de 38 % ($e_i = 0,75$). Toutefois, dans le premier cas, la porosité déterminée dans l'intervalle 0,004 à 80 μm représente 99 % de la porosité totale obtenue par densimétrie, tandis que dans le second cas elle totalise 80 %, ce qui indique le volume de pores d'une troisième famille, de rayons équivalents supérieurs à 80 μm ; ce volume de pores, composés de cavités et de galeries, est plus important dans Ap2/PCG1, en accord avec la structure. Dans le cas de l'horizon profond (Bw/PCG1), la structure microagrégée très forte qu'il présente fait que plus de 95 % de la porosité totale est constituée par des pores de taille inférieure à 80 μm .

Stabilité des agrégats

Les résultats obtenus pour la distribution de la taille des agrégats après test de stabilité sont présentés dans les figures 7 (site 1, Goiânia) et 8 (site 2, Montividiu), pour les divers profils étudiés. On observe une forte stabilité des agrégats au-dessus de 2 mm, totalisant plus de 60 % dans tous les traitements. Dans le site 1, le traitement conventionnel (PCG₁, GP/GP) et le labour profond (PCG₇, AP/AP) montrent une stabilité moins forte dans tous les horizons, tandis que pour le semis direct (PCG₁₂, PD/PD) le profil présente la meilleure stabilité ; le même résultat étant observé avec le traitement mixte (PCG₈, AP/PD) qui montre une pulvérisation limitée aux horizons de surface (0-4 cm). Les résultats obtenus au site 1 sont à mettre en relation avec la qualité structurale du sol, la bonne teneur en matière organique et la forte activité biologique.

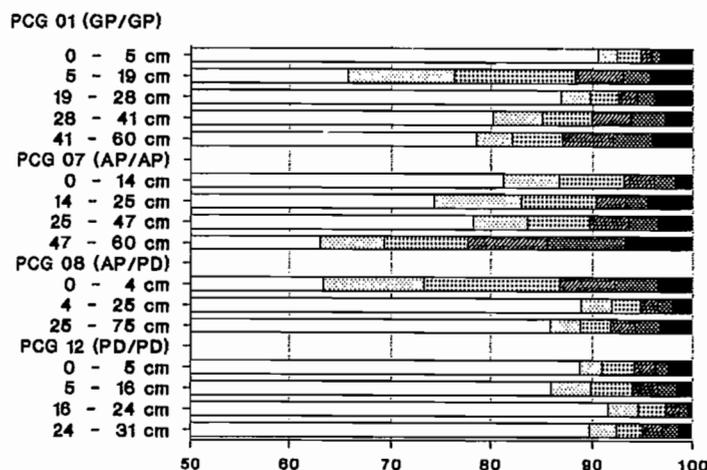


FIG. 7. — Distribution de la taille des agrégats stables dans l'eau. Site 1, Goiânia (PCG).
Water aggregate size distribution. Site 1, Goiânia (PCG).

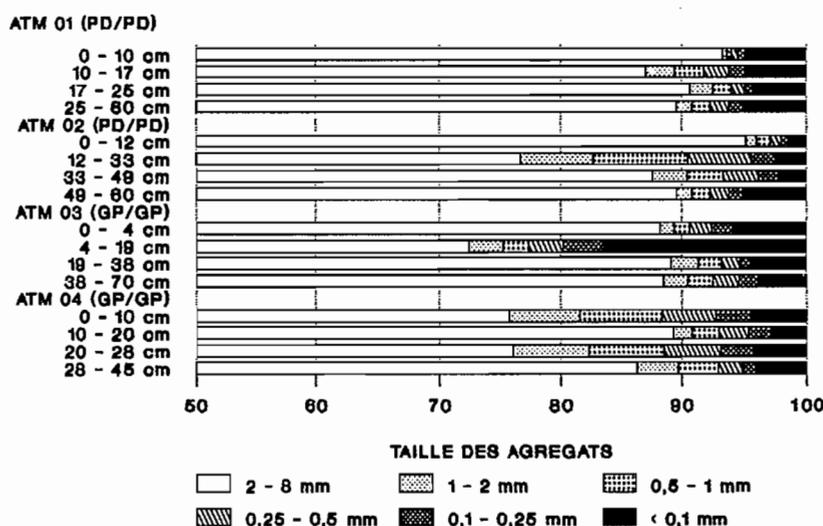


FIG. 8. — Distribution de la taille des agrégats stables dans l'eau. Site 2, Montividiu (ATM).
Water aggregate size distribution. Site 2, Montividiu (ATM).

Dans le site 2 (Montividiu), la distribution de la taille des agrégats stables montre une corrélation importante avec la distribution des volumes du sol (fig. 5) ; elle est un bon indicateur du tassement des couches, qui résulte des systèmes culturaux appliqués.

Caractérisation de la fertilité chimique du sol

Les caractéristiques chimiques présentées dans le tableau IV montrent une *augmentation de la fertilité du sol sous semis direct*, et ce pour les deux sites considérés (Goiânia, PCG, et Montividiu, ATM).

D'après Howler, cité par FLOR (1988), tous les traitements de PCG, principalement dans la couche explorée par les racines, présentent pour les paramètres de fertilité évalués, à l'exception de Ca et de Mg, des teneurs supérieures aux niveaux jugés critiques pour le haricot, plante considérée dans cette étude. Si on compare les traitements PCG01 (GP/GP) et PCG12 (PD/PD), on vérifie une augmentation de 46 %, 55 % et 17 % respectivement pour les éléments P, Ca et Mg, dans l'horizon Ap1 du profil sous semis direct, en plus de l'élimination totale de l'aluminium échangeable. La quantité de potassium dans le système conventionnel est toutefois de 59 % plus élevée que pour

TABLEAU IV
Caractéristiques chimiques des profils sous différents systèmes culturaux
Chemical characteristics of profiles under different cultural systems

Profil	Horiz.	Prof. (cm)	pH	Al (%)	P (ppm)	K	Ca ----- (méq/100 g) -----	Mg
PCG01	AP1	1-5	5,4	3,0	24	0,62	2,0	0,6
PCG01	AP2	5-19	4,9	26,2	9	0,31	0,9	0,2
PCG01	AB	19-28	4,9	21,2	1	0,12	0,8	0,2
PCG01	BA	28-41	5,0	16,9	1	0,08	0,9	
PCG01	Bw	41-60	5,4	0	1	0,04	0,9	0,1
PCG07	AP1	1-14	5,2	2,8	51	0,52	2,5	0,4
PCG07	AP2	14-25	5,2	8,7	14	0,24	1,6	0,3
PCG07	BA	25-47	5,2	6,4	1	0,15	1,1	0,2
PCG07	Bw	47-60	5,7	0	1	0,08	1,0	0,0
PCG08	AP1	1-4	5,2	8,9	20	0,34	1,5	0,2
PCG08	AP2	4-25	5,3	10,0	10	0,18	1,3	0,3
PCG08	BA	25-75	5,3	8,3	1	0,10	0,9	0,1
PCG12	AP1	1-5	5,7	0,0	35	0,39	3,1	0,7
PCG12	AP2	5-16	5,5	3,6	34	0,24	2,1	0,3
PCG12	BA	16-25	5,2	12,0	12	0,11	1,2	0,1
PCG12	Bw	25-60	4,8	30,9	1	0,07	0,6	
ATM01	AP	1-10	5,3	2,7	7	0,10	2,4	1,1
ATM01	AB	10-17	5,4	3,9	3	0,03	1,6	0,8
ATM01	BA	17-25	5,1	21,7	1	0,02	0,7	
ATM01	Bw	25-60	5,0	24,4	1	0,02	0,6	
ATM02	AP1	1-12	5,3	3,1	11	0,11	2,2	0,8
ATM02	ABp	12-33	5,3	13,0	1	0,04	0,7	0,6
ATM02	BA	33-49	5,0	24,4	1	0,02	0,6	
ATM03	AP1	1-4	4,7	19,4	5	0,06	1,0	0,6
ATM03	AP2	4-19	4,8	21,7	4	0,04	0,8	0,6
ATM03	BA	19-38	5,0	36,6	1	0,02	0,5	
ATM03	Bw	38-70	5,2	24,7	1	0,01	0,6	
ATM04	AP1	1-10	4,9	13,2	7	0,07	1,1	0,8
ATM04	AP2	10-20	4,9	19,6	3	0,03	0,6	0,6
ATM04	AB	20-28	5,0	43,0	1	0,03	0,5	
ATM04	BA	28-45	4,9	48,8	1	0,02	0,4	

le semis direct. L'analyse de l'horizon Ap2 de ces deux traitements montre des augmentations de 278 %, 133 % et 50 % respectivement pour P, Ca et Mg, et une réduction de 26,6 % à 3,6 % pour la saturation en aluminium, quand on passe du système conventionnel au semis direct, avec toutefois un contenu plus élevé (29 %) pour PCG01. Les valeurs les plus adéquates du pH se réfèrent au semis direct, si on considère les deux horizons Ap1 et Ap2, même si dans Ap1 de PCG01 ce paramètre se situe encore dans un intervalle favorable pour la culture. On observe, en plus, une tendance à l'augmentation de la saturation en aluminium et une réduction des teneurs en phosphore et en bases échangeables (Ca et Mg) avec la profondeur, avec des teneurs en phosphore au-dessus des niveaux critiques

dans le traitement par semis direct, et ce jusqu'à 25 cm, tandis que dans le système conventionnel, à partir de 19 cm, la teneur en cet élément est réduite à 1,0 mg/kg.

Les traitements du profil ATM présentent des limitations pour la majorité des constituants chimiques évalués. Dans le système conventionnel (maïs et soja), la distribution dans le profil du sol montre que la saturation en aluminium est un facteur limitant, et que les teneurs en nutriments (P, K, Ca, Mg) et le pH sont en dessous des teneurs critiques déterminées par la Commission de fertilité des sols du Goiás (1988). Les profils sous semis direct (ATM01 et ATM02), en revanche, présentent, principalement dans la couche supérieure, des valeurs favorables en ce qui concerne le pH et la saturation en aluminium.

Les effets positifs du semis direct sur le pH, la saturation en aluminium et le phosphore constatés dans ce travail sont d'une importance fondamentale pour la consolidation de ce système dans les cerrados, puisque ces paramètres sont considérés comme les facteurs les plus limitants du développement des cultures dans cette région.

Rendement agronomique et économique des cultures

L'effet des traitements appliqués dans le site 1 (Goiânia) est évalué en termes de productivité (fig. 9) et de gain (fig. 10) pour les cultures du haricot et du maïs durant les années 1990-1992.

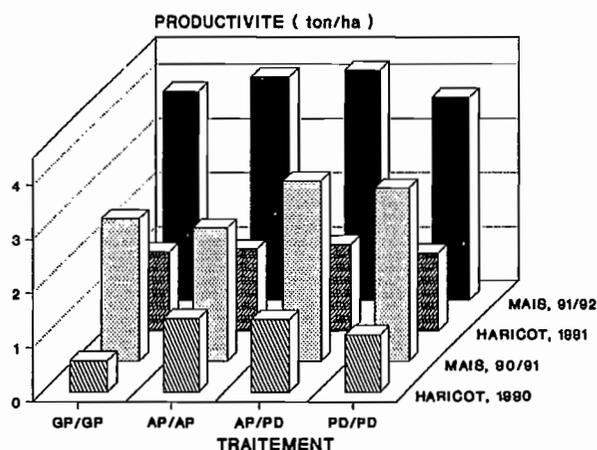


FIG. 9. — Productivité des cultures de haricot et de maïs pour divers traitements (site 1, Goiânia).

Bean and corn yields for different treatments (site 1, Goiânia).

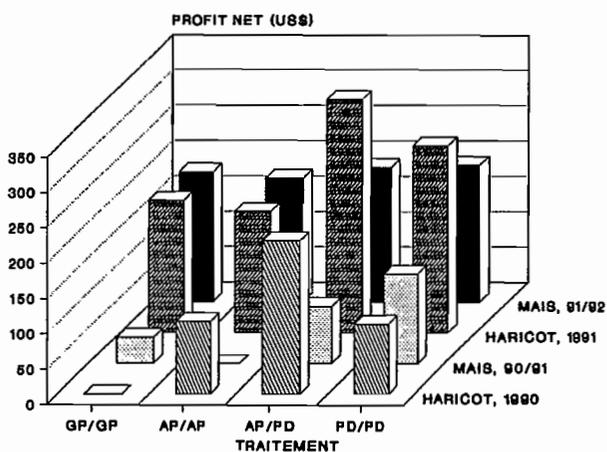


FIG. 10. — Profit net en dollars US des cultures de haricot et de maïs pour divers traitements (site 1, Goiânia).

Bean and corn net profit for different treatments (site 1, Goiânia).

En termes de productivité (t/ha/an), les traitements PCG7 (AP/AP) et PCG8 (AP/PD) présentent les meilleures performances, suivis par PCG12 (PD/PD). En termes de gain, calculé à partir des coûts de la main-d'œuvre, de produits variés et de l'irrigation, pour le haricot, les traitements PCG8 et PCG12 montrent les meilleurs résultats, avec un profit de 520 et 460 dollars US par hectare et par an, respectivement.

L'amélioration de l'état structural du sol et de la plupart des caractéristiques chimiques, qui favorisent l'obtention de meilleurs rendements, associée au coût moindre de la production, pourrait rendre viable l'utilisation du semis direct en tant que pratique alternative pour une agriculture intensive et une production soutenue dans les cerrados du Brésil central.

CONCLUSION

Cette étude a été réalisée sur les sols ferrallitiques caractéristiques de la région des cerrados (de l'État du Goiás en particulier), développés sur les couvertures détritico-latéritiques, rouges, argileuses, du quaternaire.

Ces sols présentent, dans les conditions de végétation naturelle, une structure microagrégée bien organisée qui engendre une porosité très importante, tant en surface qu'en profondeur, sur un profil profond.

Lorsqu'ils sont soumis à une exploitation agricole intensive avec utilisation d'outils agricoles inadéquats, en particulier les pulvérisateurs autoporteurs à disques lourds (*grade pesada*), ces sols souffrent d'une pulvérisation excessive des couches superficielles qui conduit à un tassement des horizons de moyenne profondeur, lequel tend à augmenter leur susceptibilité à l'érosion et leur encroûtement superficiel.

L'étude de plusieurs systèmes de préparation du sol avec la méthode d'analyse morphostructurale met en évidence les points suivants : une tendance au tassement des horizons subsuperficiels ; l'influence assez nette des traitements antérieurs ; une activité biologique particulièrement forte sous semis direct, plus particulièrement mise en évidence dans le site 2 (Montividiu) ; une humidité relativement plus forte de tous les horizons des profils sous semis direct.

L'analyse micromorphologique du profil de référence montre que l'unité d'assemblage élémentaire est le microagrégat et que la taille et la forme des pores sont conditionnées par le type d'organisation de ces agrégats. Elle montre également que les chenaux/cavités sont beaucoup mieux représentés dans les horizons qui ne sont pas soumis à l'influence des outils agricoles.

Cette même analyse micromorphologique appliquée aux différents traitements culturels fait apparaître un net tassement des horizons subsuperficiels des sols soumis au traitement GP/GP, tandis que dans le traitement PD/PD,

bien que présentant un certain tassement localisé, l'existence d'une très forte activité biologique est responsable d'une macroporosité importante dans ces horizons.

La densimétrie et la distribution de la taille des pores, déterminée de manière globale par la rétention de l'eau dans le sol, et de manière particulière par l'intrusion du mercure, permettent la quantification des différents types de pores et de leur évolution :

— la porosité interne des microagrégats est constante dans les profils et n'est pas modifiée par les traitements culturaux ;

— la porosité d'assemblage des microagrégats, qui est également importante en profondeur, est affectée par le tassement des horizons superficiels (particulièrement en Ap2) ; on observe une diminution des pores ; *cette variation est fonction du système cultural adopté* ;

— la porosité d'ordre biologique, grossière, composée de chenaux/cavités et de gros pores tubulaires, notable en profondeur, apparaît globalement réduite dans les horizons subsuperficiels (quel que soit le traitement mais bien moindre avec le semis direct) ; elle est parfois totalement éliminée par le tassement.

La distribution de ces types de pores dans les horizons est fonction de leur structure et de leur sous-structure.

Le compactage et le tassement produits par les traitements culturaux, particulièrement ceux relatifs aux systèmes conventionnels (GP) avec utilisation de pulvérisateurs autoporteurs à disques lourds, affectent les propriétés physico-hydriques des horizons superficiels du sol. La réserve en eau du sol est réduite, l'eau restante est confinée dans les pores de taille très fine.

Ces modifications mettent en évidence la résistance et la stabilité des microagrégats, mais rendent également compte de la fragilité de la structure globale du sol. Le travail intensif du sol avec des outils agricoles inappropriés provoque une pulvérisation excessive des couches superficielles et, lorsqu'il est associé à une utilisation non rationnelle de l'irrigation, conduit à des risques importants de dégradation de l'environnement, en plus de la chute des rendements des cultures. Le semis direct, en ce sens, montre une série d'avantages, confirmés dans tous les traitements considérés dans cette étude, notamment quand on le compare avec le système conventionnel (GP).

L'augmentation de la densité du sol et la conséquente diminution de la porosité interagrégat observées dans les traitements sous semis direct, confirmées par SÉGUY *et al.* (1984), montrent la nécessité d'une période de transition entre le traitement conventionnel (GP) et le système alternatif (PD), transition qui inclut une préparation du sol en profondeur, afin de diminuer le tassement des horizons subsuperficiels par un labour ou une scarification jusqu'à 30 cm de profondeur environ. Cette préparation profonde doit être complétée par une correction chimique du sol (chaulage et phosphatage), et par l'introduction d'espèces végétales à haut rapport C/N, comme les engrais verts, en succession avec la culture principale de maïs ou de riz, qui vise à l'augmentation des taux de matière organique et de l'activité biologique du sol, ainsi qu'à la formation d'un mulch pour le semis direct (FREITAS et BLANCA-NEAUX, 1991).

Cette transition a enfin pour objectif la réalisation de systèmes agroécologiques intégrés incluant la rotation et la succession des cultures, la gestion rationnelle du sol ainsi que celle des différentes pratiques de contrôle des maladies et insectes, la fertilisation par engrais verts, entre autres (FREITAS *et al.*, 1992).

En plus de tous les avantages relatifs au semis direct vérifiés dans cette étude, nous signalons, avec divers auteurs, la tolérance au *verânico* et les risques moindres des cultures vis-à-vis des variations climatiques, un intervalle de temps plus grand pour la préparation du sol, une fluctuation moindre de la température du sol, une meilleure rentabilité du fait du niveau inférieur des dépenses (engrais, agrototoxiques, etc.), un contrôle accru de l'érosion qui favorise globalement un meilleur équilibre écologique et une meilleure protection de l'environnement.

Les conclusions agronomiques ont été obtenues sur deux cycles culturaux. Pour être tout à fait objectif, et sans rien enlever des qualités reconnues ici au semis direct, il conviendrait de confirmer ces résultats sur des périodes qui soient suffisamment longues pour porter un jugement définitif sur toutes les catégories de plantes cultivées et sur le contrôle de tous les effets d'une utilisation abondante d'herbicides et de pesticides sur le sol, le sous-sol et les produits végétaux.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMOLI (J.), MACEDO (J.), AZEVEDO (L.), MADEIRA NETTO (J. S.), 1986 — « Caracterização da região dos cerrados ». In : Goedert (W. J.), éd. : *Solos dos cerrados : Tecnologias e estratégias de manejo*, Brasília, Embrapa/CPAC : 33-74.
- AMABILE (R. F.), RESCK (D. V. S.), 1990 a — *Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo na produção de soja e milho em*

um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso. I. Comparação de dois métodos de avaliação de raízes. Planaltina, Embrapa/CPAC, 3 p.

- AMABILE (R. F.), RESCK (D. V. S.), 1990 b — *Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo na produção de soja e milho em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso. II. Produção*

- em grãos e dados fenológicos. Planaltina, Embrapa/CPAC, 3 p.
- ARDENGI (A. F.), 1989 — *Efeito de métodos de preparo do solo e controle de plantas daninhas sobre propriedades físicas e químicas de um Latossolo Roxo Eutrófico, cultivado com milho durante 10 anos*. Tese de Mestrado, Viçosa, UFV, Impr. Univ., 68 p.
- Bioma Cerrado, 1991 — *Subsídios para estudos e ações*. Goiânia, Universidade Católica de Goiás, Instituto do Tropicó subúmido, 16 p. (Documento elaborado pelo Fórum das ONGs Goianas para o Meio Ambiente).
- BLANCANEUX (P.), FREITAS (P. L. DE), AMABILE (R. F.), 1991 a — « Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do perfil cultural ». In : *Reunião técnica sobre a metodologia do perfil cultural*, Londrina, PR Brasil, 4-8/2/1991, Goiânia, Embrapa/SNLCS, 27 p., *multigr.*
- BLANCANEUX (P.), KER (J. C.), CHAGAS (S. C. DA), CARVALHO FILHO (A. DE), AMABILE (R. F.), FREITAS (P. L. DE), CARVALHO Jr (W. DE), MOTTA (P. E. DA), COSTA (L. D. DA), PEREIRA (N. R.), 1991 b — « Interações ambientais na microbacia piloto de Goiás (Morrinhos). III. Organização e funcionamento da cobertura pedológica ». In : *Congr. Bras. Ciência do Solo*, 23, Porto Alegre (RS), 21-27/7/1991, Goiânia, Orstom/Embrapa-SNLCS, Resumo 380.
- BRANDAO (M.), 1991 — Considerações sobre a formação do cerrado. *Informe Agropecuario, Belo Horizonte*, 15 (168) : 5-7.
- BRASIL (A. E.), 1983 — *Projeto Radambrasil. Folha SE 22 Goiânia. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, Ministério das Minas e Energia, Levantamento de Recursos Naturais, 31, 768 p.
- BRASIL (A. E.), ALVARENGA (S. M.), 1989 — « Relevo ». In : *Geografia do Brasil*, Rio de Janeiro, v. 1 : *Região Centro-Oeste* : 53-72.
- BREWER (R.), 1964 — *Fabric and mineral analysis of soils*. New York, John Wiley, 470 p.
- BRUAND (A.), 1985 — *Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation des matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois*. Thèse 3^e cycle, univ. Paris-VII, 225 p.
- BRUAND (A.), 1991 — « Characterization of the groundmass porosity, water retention and shrinkage properties : Partial results and first analysis ». In : *First year report of the EEC Project : Improvement of productivity of Crusting Soils and Depleted Sandy Soils in Zimbabwe areas under intensive cropping*, Orléans, Inra, Ardon, SESCOF, 31 p., *multigr.*
- BULLOCK (P.), FEDOROFF (N.), STOOBS (G.), TURSINA (T.), BABEL (U.), 1985 — *Handbook for Soil Thin Section Description*. Wolverhampton, Waine Research Publ.
- CARVALHO (S. R. DE), 1990 — *Tassement des sols ferrallitiques mis en culture. Apport d'une analyse compartimentale de l'espace poral de sols « Podzolicos »*. État de Rio de Janeiro, Brésil. Thèse doct., Inra/SESCOF.
- CENTURION (J. F.), DEMATÉ (J. L. I.), 1992 — Sistemas de preparo de solos de cerrado : efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 19 (7) : 315-324.
- CHAUVEL (A.), GRIMALDI (M.), TESSIER (D.), 1991 — Changes in soil pore-space distributions following deforestation and revegetation : An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecol. and Management*, 38 : 259-271.
- CHAUVEL (A.), PEDRO (G.), TESSIER (D.), 1976 — Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. Études expérimentales. *Science du sol*, 2 : 101-113.
- COCHRANE (T. T.), PORRAS (J. A.), HENAO (M. DEL R.), 1988 — « The relative tendency of the cerrados to be affected by verânicos : a provisional assessment ». In : *Simpósio sobre o Cerrado : Savanas, alimento e energia*, 6, Brasília, 1982, Planaltina, Embrapa-CPAC : 229-242.
- Comissão de Fertilidade de Solos de Goiás, 1988 — *Recomendações de corretivos e fertilizantes para Goiás. 5^a Aproximação*. Goiânia, UFG/Emgopa, Informativo Técnico, 1, 101 p.
- CRUZ (V. B.), SOUZA (S. M. T. DE), NUNES (G. S. S.), 1979 — « Recursos hídricos para a agricultura dos cerrados ». In : *Simpósio sobre o Cerrado : Uso e manejo*, 5, Brasília, 1979, Planaltina, Embrapa-CPAC : 232-260.
- DEDECKE (R. A.), RESCK (D.V.S.), FREITAS Jr (E. DE), 1986 — Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-Escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 10 (3) : 265-272.
- EL SWAIFY (S. A.), 1980 — « Physical and mechanical properties of oxisols ». In Theng (B. K. G.), éd. : *Soil with variable charge*, New Zealand Society of Soil Science, 448 p.
- EMBRAPA/SNLCS (Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos), 1979 — *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA/SNLCS (Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos), 1981 — *Mapa de Solo do Brasil*. Rio de Janeiro.
- FLOR (C. A.), 1988 — *Revision de algunos criterios sobre el problema de la recomendación de fertilizantes en frijol*. Cali, CIAT, 29 p.
- FREITAS (P. L. DE), 1988 — *Effects of soil structure on root growth and function*. PhD Thesis, Cornell Univ., Ithaca, 213 p.
- FREITAS (P. L. DE), BLANCANEUX (P.), 1991 — Condição estrutural do solo para o plantio direto. *Informativo AEAGO*, 1 (1).
- FREITAS (P. L. DE), BLANCANEUX (P.), 1994 — « Metodologia de pesquisa em manejo do solo : Estrutura e Porosidade do Solo ». In Puigneau (J.), éd. : *Metodologias para investigación en manejo de suelos*, Montevideo, IICA-Procisur. *Diálogo*, 39 : 25-42.
- FREITAS (P. L. DE), BLANCANEUX (P.), AMABILE (R. F.), 1992 — Sistemas agroecológicos integrados. *Informativo AEAGO*, 1 (3).
- GAUTRONNEAU (Y.), MANICHON (H.), 1987 — *Guide méthodique du profil cultural*. Paris, Gera et Ceret, 71 p.
- GOEDERT (W. J.), 1989 — Região dos Cerrados : Potencial agrícola e seu política para desenvolvimento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 24 (1) : 1-17.
- GOEDERT (W. J.), LOBATO (E.), 1986 — « Agro-economic considerations of modern agriculture on Oxisols ». Trabalho

- apresentado no VIII International Soil Classification Workshop, Brasília.
- GOEDERT (W. J.), LOBATO (E.), WAGNER (E.), 1980 — Potential agrícola da região dos Cerrados Brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 15 (1) : 1-17.
- HARROLD (L. L.), 1984 — « Efeito de sistemas de preparo reduzido do solo sobre a erosão causada pelas águas ». In : *Plantio Direto no Brasil*, Campinas, Fundação Cargill : 93-107.
- KEMPER (W. D.), 1965 — « Aggregate stability ». In Klute (A. K.), éd. : *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Madison, ASA/SSSA, Agronomy, 9 : 511-519.
- KER (J. C.), PEREIRA (N. R.), CARVALHO Jr (W. C.), CARVALHO FILHO (A. DE), 1992 — « Cerrado : Solos, Aptidão e potencialidade agrícola ». In : *Simposio sobre Manejo e Conservação do Solo no Cerrado*, Campinas, Fundação Cargill : 1-31.
- KERTZMAN (F. F.), 1989 — *Modification de la structure et des propriétés physiques des couches superficielles d'un « Latossolo Roxo » (Guaira, São Paulo, Brésil) soumis à une irrigation par aspersion*. DEA, pédologie, univ. Pierre et Marie Curie, univ. Nancy-1, univ. Franche-Comté, Inra, Ensa, 48 p., multigr.
- LUCHIARI Jr (A.), RESENDE (M.), RITCHEY (P. I. M. DE), 1986 — « Manejo do solo e aproveitamento de água ». In Goedert (W. J.), éd. : *Solos dos cerrados : Tecnologias e estratégias de manejo*, Brasília, Embrapa/CPAC : 285-322.
- MALAVOLTA (E.), KLIEMANN (H. J.), 1985 — *Desordens nutricionais no Cerrado*. Piracicaba, Potafos, 136 p.
- REZENDE (C.), SILVA (L. T. C.), FREITAS (P. L. DE), BLANCANEUX (P.), AMABILE (R. F.), 1992 — « Efeito do preparo do solo na resposta da cultura do feijão a disponibilidade de água ». In : *IX Reun. Bras. Manejo e Conserv. Solo e Agua*, CNPq, Embrapa/SNLCS, CRCO e Orstom, Jaboticabal, 12-18 juillet 1992.
- SÉGUY (L.), 1987 — *Influência agro-econômica de diversos métodos de preparo do solo sobre varias culturas em sistemas de rotação*. Goiânia, Embrapa/CNPq, Projeto de pesquisa, 31 p.
- SÉGUY (L.), KLUTHCOUSKI (J.), SILVA (J. G. DA), BLUMENSCHNEIDER (F. N.), 1984 — *Técnica de preparo do solo, efeitos na fertilidade e na conservação do solo, nas ervas daninhas e na conservação de água*. Goiânia, Embrapa/CNPq, Circular Técnica, 17, 26 p.
- SIDIRAS (N.), VIEIRA (S. R.), ROTH (C. H.), 1984 — Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto e plantio convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 8 : 265-268.
- SILVA (L. T. DA), FREITAS (P. L. DE), BLANCANEUX (P.), RAFAEL (F. J.), RIBEIRO Jr (W. Q.), CORREA (J. R.), JORGE (H. D.), 1991 — « Efeito da disponibilidade de água e preparo do solo na cultura do feijão ». In : *Congr. Bras. Ciência do Solo*, 23, Embrapa/SNLCS, Orstom, CNPq, Emgopa, Porto Alegre, 21-27/7/1991, Resumo 166.
- SORRENSEN (W. J.), MONTOYA (L. J.), 1989 — *Implicações econômicas da erosão do solo e do uso de algumas práticas conservacionistas do Parana*. Londrina, IAPAR, Bol. Tec., 21, 104 p.
- STONER (E. R.), FREITAS Jr (E. DE), MACEDO (J.), MENDES (R. C. A.), CARDOSO (I. M.), AMABILE (R. F.), BRYANT (R. B.), LATHWELL (D. J.), 1991 — Physical constraints to root growth in savana oxisols. *Trop. Soils Bull.*, 91 (1) : 1-28.
- TESSIER (D.), 1984. — *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse, univ. Paris-VII, 360 p.
- VIEIRA (M. J.), MUZILLI (O.), 1984 — Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 19 (7) : 873-882.
- VIEIRA (M. J.), 1985 — « Comportamento físico de solo em plantio direto ». In : *Atualização em plantio direto*, Campinas, Fundação Cargill : 163-179.

Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquences sur la durabilité des agrosystèmes andins

Georges DE NONI et Marc VIENNOT

Centre Orstom, BP 5045,
34032 Montpellier cedex 1, France.

RÉSUMÉ

Jusqu'à l'arrivée des Espagnols, les Andes équatoriennes étaient cultivées par des sociétés qui avaient su développer des stratégies agricoles adaptées aux conditions extrêmes de la montagne.

La conquête espagnole introduit l'élevage bovin, de nouvelles cultures et techniques culturales, regroupe les populations dans le cadre contraignant de l'hacienda, et bouleverse le système ancestral. Les cultures se pratiquent désormais dans les bassins interandins tandis que l'élevage s'étend sur les versants de façon très extensive ; le front d'occupation des sols reste stable car la population a très peu augmenté en trois siècles.

Au choc de la conquête succède, à la fin du siècle dernier, celui de l'explosion démographique : la population décuple en moins d'un siècle, passant d'un million d'habitants à onze millions de nos jours. Les structures agricoles coloniales deviennent caduques. Pour désamorcer une crise sociale, le gouvernement abolit l'état de servitude et promulgue les lois de réforme agraire (1964 et 1974). Les propriétaires d'hacienda sont contraints de se défaire d'une partie de leurs terres et de les concéder à leurs employés. La redistribution concerne surtout les terres des versants trop déclives ou accidentées et celles de haute montagne, de climat froid et humide. On assiste à une « relocalisation » du petit paysannat et à la constitution d'un nouveau « minifundio » qui va rapidement se diviser, car les quelques hectares octroyés par foyer ne suffisent pas pour assurer l'alimentation d'une population en expansion. Le minifundio va s'étendre sur les zones marginales jusqu'alors délaissées puis coloniser les terres froides de parcours, jusqu'à 4 000 m d'altitude.

Le minifundio se caractérise par une densité de population très élevée : 50 à plus de 200 habitants au kilomètre carré. Il intéresse 80 % des exploitations mais n'occupe que 20 % des terres consacrées aux cultures vivrières. Dans la majeure partie des cas, ce sont des terres difficiles (relief, climat), jadis affectées à l'élevage.

Les haciendas, concentrées dans le bassin, pratiquent un élevage extensif. Elles ne représentent que 1 % des exploitations mais occupent 35 % des terres et sont localisées sur les terres faciles. Seules capables de dégager des excédents, les haciendas profitent de la législation, bénéficient des aides et ont accès aux grands marchés.

L'agriculture est en situation de crise ; malgré l'augmentation de surface du minifundio, la production de céréales est tombée au quart de ce qu'elle était en 1970. Le minifundio est confronté à une érosion catastrophique qui affecte ses potentialités alimentaires ; pourtant, des études ont montré que des techniques conservatoires simples, et à la portée du paysan, pouvaient la ramener à un niveau admissible. L'érosion se situe de 0,2 à plus de 0,4 t/ha/an à Mojanda, sur des parcelles améliorées, contre 0,8 à 1,8 t/ha/an sur les parcelles traditionnelles, tandis qu'à Riobamba on a mesuré 0,3 à 4,5 t/ha/an contre 4,5 à plus de 50 t/ha/an. Il est indispensable d'intervenir rapidement avant d'atteindre des niveaux de dégradation qui nécessiteraient une réhabilitation plus complexe dont le coût est hors de portée du paysan.

MOTS CLÉS : Équateur — Andes — Érosion — Ruissellement — Agrosystème — Stratégies paysannes — Durabilité.

ABSTRACT

RECENT CHANGES IN ECUADOREAN AGRICULTURE
AND THE CONSEQUENCES FOR THE SUSTAINABILITY OF ANDEAN AGROSYSTEMS

Up to the arrival of the Spanish, the Ecuadorian Andes were cultivated by native societies which had developed agricultural strategies adapted to the severe mountainous climatic conditions.

The Spanish conquest which led to the introduction of cattle breeding, new crops and cultivation techniques and gathered populations within the constraints of the hacienda would upset the old system. Currently, crops are produced in inter-andean basins, while extensive breeding extends to slopes, land use remains stable for population barely increased within three centuries.

The impact caused by the conquest was followed by that caused by the population growth : population increased tenfold within less than one century and went from 1 to 11 millions currently. Colonial agricultural structures became obsolete. In order to defuse a social crisis, the government abolished slavery and promulgated the agrarian laws (1964 and 1974). The hacienda owners were forced to get rid of part of their lands and to grant them to their employees. Redistribution concerned above all the lands situated on the very steep slopes or the uneven ones and those situated in altitude under cold and moist climatic conditions. A « resettlement » of the farming community was observed as well as the creation of a new minifundio which would quickly be divided for the few hectares of land granted to each home were not sufficient to feed a growing population. The minifundio would extend to the marginal areas which were abandoned up to now and to the cold pasturelands up to 4,000 m.

The minifundio was characterized by a very high population density ranging from 50 to more than 200 inh./km². It represented 80 % of the farms but it covered only 20 % of the lands used for food crops. In most cases, they were lands which were hard to cultivate (relief, climate) where breeding was practised.

The haciendas centred in the basin practised an extensive breeding. They represented only 1 % of the farms but they covered 35 % of the lands and were situated in lands which were easy to cultivate. The haciendas which were the only to be able to produce surpluses took advantage of legislation, profited by aids and got access to the great markets.

The agricultural situation underwent a critical period; despite the increase in the areas of the minifundio, cereal production has decreased by 400 % since 1970. The minifundio was confronted with a dramatic erosion which affected its food potentialities; however, some studies showed that simple preservation techniques available to the farmer could bring it to a reasonable level. Erosion ranged from 0.2 to more than 0.4 t/ha/year at Riobamba, in improved plots as against 0.8 to 1.8 in traditional plots, while at Mojanda it ranged from 0.3 to 4.5 as against 4.5 to more than 50 t/ha/year. It was necessary to take rapid measures without reaching degradation levels which required then a more complex rehabilitation whose cost was prohibitive for the farmer.

KEYWORDS : Ecuador — Andes — Erosion — Runoff — Agrosystem — Rural strategies — Sustainability.

RESUMEN

MUTACIONES RECIENTES DE LA AGRICULTURA ECUATORIANA
Y CONSECUENCIAS SOBRE LA DURABILIDAD DE LOS AGROSISTEMAS ANDINOS

Antes de la llegada de los españoles, las sociedades indígenas que supieron desarrollar estrategias agrícolas adaptadas a las condiciones extremas de los Andes equatoriales.

La Conquista llega a trastornar el sistema ancestral por la introducción de la ganadería bovina, nuevos cultivos con sus respectivas técnicas, y la agrupación de las poblaciones en el marco impositivo de la hacienda. Los cultivos se hacen ahora en las cuencas interandinas mientras que la ganadería se extiende en los vertientes en forma extensiva. El frente de ocupación se queda muy estable pues, apenas crece la población.

Al impacto de la Conquista sucede el de la explosión demográfica (la población aumenta diez veces en menos de un siglo pasando de 1 a 11 millones de habitantes. Las estructuras coloniales se vuelven inadecuadas. Así para parar una crisis social el gobierno de entonces suspende el estado de esclavitud y promulga las leyes de reforma agraria (1964 et 1974). Los hacendados tienen que deshacerse una de parte de sus tierras y entregarlas a sus trabajadores. La atribución concierne sobre todo las tierras difíciles con pendiente excesiva y las tierras frías y húmedas de altura. Se constata una reubicación del pequeño campesinado y la constitución de un nuevo minifundio que se divide rápidamente pues las pocas hectáreas atribuidas por hogar no logran abastecer la creciente población. El minifundio tiene que extenderse hacia las tierras marginales rechazadas hasta entonces y coloniza arriba, las tierras frías del páramo a los 4 000 m.

El minifundio se caracteriza por su alta densidad poblacional : 50 hasta 200 hab./km². Se refiere al 80 % de las unidades agrícolas, sin embargo no ocupan más del 20 % de las tierras. Se dedica sobre todo a cultivos alimenticios de autoconsumo en tierras difíciles mientras que las haciendas ubicadas en las tierras fáciles de las cuencas, se dedican a una ganadería muy extensiva. Representan el 1 % de las unidades en el 35 % de las tierras. Son capaces de sacar excedentes agrícolas, aprovechan la legislación, se benefician de los incentivos y tienen acceso a los grandes mercados.

La situación agrícola está en una grave crisis. A pesar del aumento de las superficies cultivadas en el minifundio, la producción agrícola disminuyó desde 1970 : por las cereales del 400 %. El minifundio se encuentra arrastrado por una erosión catastrófica que afecta sus posibilidades alimenticias. Estudios llevados conjuntamente entre el Ecuador y el Orstom mostraron que técnicas sencillas de conservación y al alcance del campesino la pueden reducir hasta ser admisible. En Mojanda, la erosión se sitúa entre 0,2 hasta 0,4 t/ha/año en las parcelas mejoradas, 0,8 hasta 1,8 en la parcela tradicional mientras que, en Riobamba se midió 0,3 hasta 4,5 en la mejorada y 5,5 hasta más de 50 t/ha/año en la tradicional. Es menester intervenir rápidamente sin llegar a niveles de degradación que necesiten una rehabilitación compleja cuyo costo estaría fuera de los medios del campesino.

PALABRAS CLAVES : Ecuador — Andes — Erosión — Esguerramiento — Estrategia campesina — Durabilidad.

INTRODUCTION

L'Équateur est formé de trois grandes régions naturelles : la côte pacifique à l'ouest, une partie du bassin amont de l'Amazonie à l'est, et au centre, entre ces deux régions, la montagne andine ou « Sierra ». Au cours des trente années écoulées, l'agriculture a été le siège de mutations profondes en dépit des contraintes imposées par le milieu : vastes espaces vierges et mal connus sur la côte et en Amazonie, pente et altitude dans la Sierra. Ces conditions naturelles difficiles, parfois extrêmes, n'ont pas empêché la progression des fronts de colonisation agricole, en particulier dans la Sierra, où la mutation des populations vivant en altitude constituait un défi majeur par rapport à la situation des milieux côtier ou amazonien, dont la mise en valeur n'était limitée ni par le froid ni par le relief.

Tant que les densités de population sont restées faibles dans la Sierra, les hommes ont pu maîtriser l'exploitation des ressources naturelles tout en préservant l'environnement. La référence la plus remarquable se situe à l'époque précolombienne, où les sociétés indigènes avaient développé des stratégies et des techniques agricoles bien adaptées aux pentes andines ; par exemple, l'irrigation associée à des terrasses de culture et l'utilisation de terroirs localisés dans plusieurs étages écologiques. Par la suite, la conquête espagnole, en provoquant un regroupement de la population dans un seul étage écologique situé dans le bassin interandin et en renforçant la pression de l'homme sur le sol, a certainement contribué à une extension des risques de dégradation sans déclencher pour autant des phénomènes manifestes eu égard aux faibles densités humaines de l'époque (à la fin du siècle dernier, la population ne dépasse pas un million d'habitants). C'est à l'époque contemporaine que le fort accroissement démographique

du secteur rural (la population actuelle est supérieure à dix millions d'habitants) et la réforme agraire vont conduire à une redistribution spatiale du petit paysannat (« minifundio ») vers les sommets et à une accélération des phénomènes de dégradation.

En s'installant sur les versants et les hautes terres andines, le minifundio a engendré un modèle d'agrosystème qui lui est propre et qui sort des normes classiques de l'agronomie. Dorénavant, le seul recours du paysan est de composer avec les conditions du milieu, car un retour vers des terres situées sous la cote des 3 000 m d'altitude dépendrait d'une nécessaire évolution sociale à l'échelon national, dont il est difficile, *a priori*, d'évaluer la perspective. Il semble donc justifié de s'interroger sur la « durabilité » de ces hautes terres transformées en agrosystème, tant pour la génération actuelle que pour la suivante. C'est dans cet esprit qu'une étude a été menée dans deux régions des Andes équatoriennes d'altitude supérieure à 3 200 m, dans les minifundios de Mojanda et Riobamba, où l'érosion agricole constitue une des contraintes majeures pour une gestion durable des terres.

LES MUTATIONS DE L'AGRICULTURE DANS LES ANDES

Au cours des trente dernières années, les Andes ont été le siège d'importantes transformations agraires qui ont modifié radicalement l'utilisation et l'occupation des sols sur les versants et les hautes terres de la Sierra. Le minifundio, principalement cantonné jusqu'alors sous la dépendance des haciendas, va quitter les terres du bassin et se sédentariser dans l'étage écologique situé au-delà de 3 000-3 200 m.

Utilisation et dynamique des écosystèmes avant les mutations

La Sierra est un énorme massif montagneux appartenant aux Andes dont la largeur maximale est d'environ 100 à 120 km. Elle se dédouble en deux chaînes de montagne parallèles : la cordillère occidentale face au Pacifique et la cordillère « real » du côté de l'Amazonie. Entre ces deux chaînes se trouve une profonde dépression (*graben*) qui est formée par une enfilade de petits bassins d'effondrement dont l'altitude d'ensemble se situe entre 1 500 m et 3 000 m. À partir de 3 000-3 200 m, on pénètre dans le domaine des versants de cordillère, relayé vers 3 600-3 800 m par les hautes terres (*páramos*).

Avant 1960, les terres agricoles étaient occupées par de grands domaines, les haciendas ou « latifundios ». Leur mode de fonctionnement, hérité de la conquête espagnole,

était fondé sur l'emploi d'une importante main-d'œuvre servile, organisée en minifundio à la périphérie des haciendas. La gestion des terres et des hommes était donc contrôlée par un petit groupe d'individus : on estimait, à cette époque, que les exploitations d'une superficie supérieure à 20 ha ne représentaient que 10 % à peine du nombre total d'exploitations et englobaient près de 85 % des terres cultivées (fig. 1). Parmi celles-ci, 60 % environ correspondaient à d'immenses domaines de plus de 500 ha, certains pouvant se prévaloir de posséder un volcan de plus de 5 000 m d'altitude ! L'utilisation agricole des sols était très inégale et se trouvait concentrée, en général, sur les terres fertiles et de pente modérée du bassin interandin (interfluves et terrasses alluviales), où l'on pratiquait l'élevage bovin et localement la culture céréalière, tel le blé. On estimait que 80 % des terres, appartenant à des haciendas de plus de 100 ha, n'étaient pas cultivées.

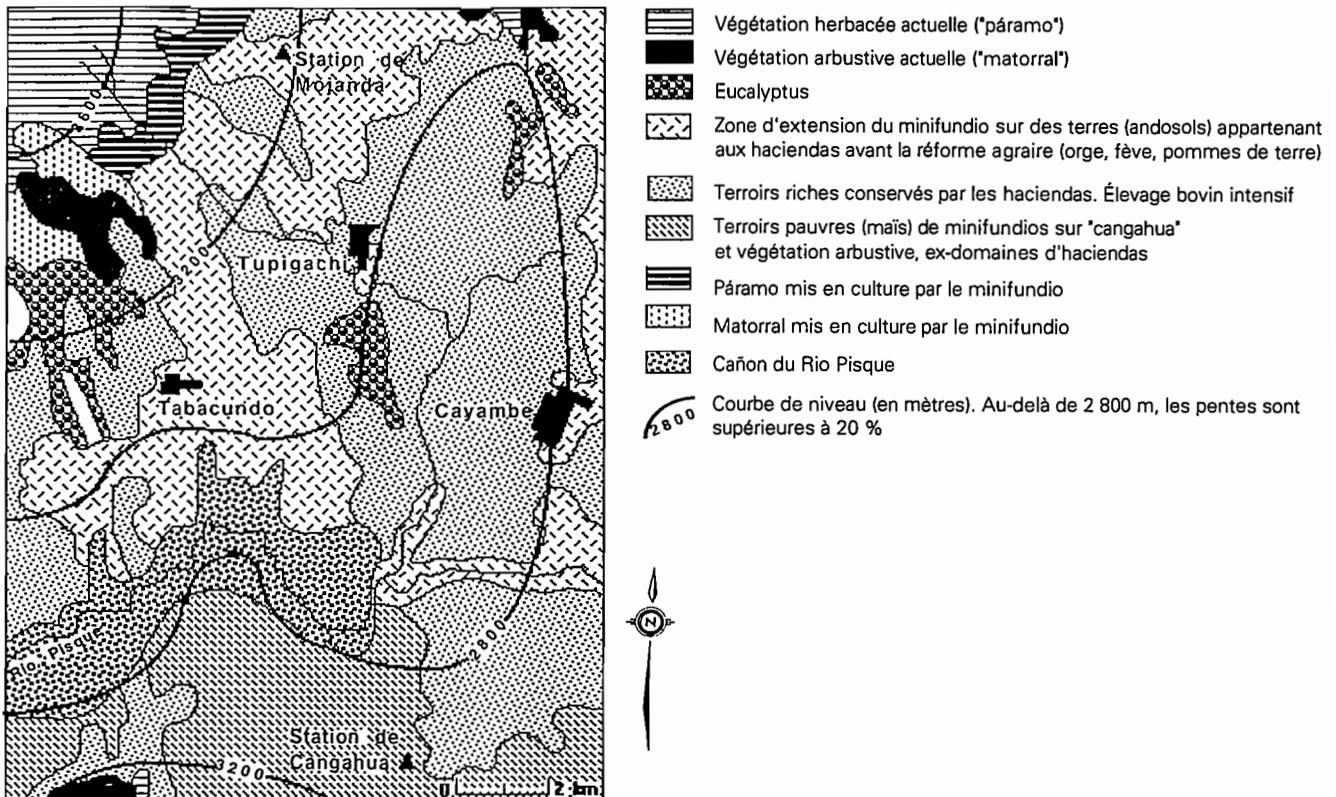


FIG. 1. — Transformations agraires dans le bassin de Cayambe (1938-1988).
 Agricultural change in the interandean Cayambe valley (1938 to 1988).

Les terres d'altitude supérieure à 3 000-3 200 m se distinguent par un modelé de haute montagne d'une relative jeunesse (plio-quadernaire) qui continue, de nos jours, à subir des mouvements tectoniques et la formation de

grands stratovolcans. Globalement, ce modelé est agencé en une succession vertigineuse de versants où l'épaisse couche de cendres volcaniques (Sierra nord et centre) confère à l'ensemble une morphologie très homogène. Les

versants présentent des profils longitudinaux à dominante rectiligne, en forme de planèze, d'échelle kilométrique pour les plus significatifs, des pentes vigoureuses (40-70 %) et des dénivelées impressionnantes entrecoupées par des gorges profondes (*quebradas*).

Sur ces versants, on distingue principalement les types suivants de végétation (en partie « secondarisée » ou introduite depuis la colonisation) :

— des prairies de « kikuyo » (*Pennisetum clandestinum*), de « orejuela » (*Alchemia orbiculata*), de « milin » (*Cynodon* sp.), de luzerne (*Medicago* sp.)... ;

— des arbustes du type « chilca » (*Baccharis* sp.) et « rétama » = genêt (*Spartium junceum*)... ;

— des arbres tels le « quishuar » (*Buddleia incana*), le cyprès (*Cupressus macrocarpa*), le « capulí » (*Prunus serotina*)... et surtout l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) qui, introduit au siècle dernier, fait l'objet de reboisements importants qui ont profondément modifié les paysages agraires.

Sur la partie haute des versants, à partir de 3 500-3 600 m, la végétation devient plus fermée et moins diversifiée car le risque de gelée est fort de juin à août pendant l'été. Elle est dominée par une formation arborée ouverte connue sous le vocable de *matorral* ou *chaparral*.

À partir de 3 800 m, on pénètre dans le domaine des hautes terres. Le relief s'adoucit et laisse entrevoir un modelé monotone où alternent des bas-fonds tourbeux et de larges ondulations aux pentes comprises entre 20 et 40 %. On observe également de nombreux petits lacs, témoins de l'action passée des glaciers. Cet étage est couvert uniformément par une formation herbacée d'altitude (*Stipa ichu*) appelée *páramo*. Les risques de gelée sont de plus en plus importants à cette altitude tout au long de l'année. Au-delà de 4 200-4 400 m, la végétation disparaît pour laisser place à la roche puis aux neiges pérennes.

Avant les pénétrations successives des fronts de colonisation, ces types de végétation spontanée occupaient l'espace de façon plus homogène et procuraient ainsi aux sols une protection efficace. Des observations de terrain réalisées de nos jours, entre 3 200 et 4 000 m, dans des zones encore vierges de toute pression humaine, dans des conditions comparables à celles qu'on pouvait trouver à cette époque, confirment cette hypothèse. Lorsque l'érosion est présente, ses manifestations sont localisées et contribuent à la dynamique d'un écosystème en déséquilibre naturel (DE NONI et VIENNOT, 1985). En milieu humide (précipitations supérieures à 1 500 mm/an), des mouvements de masse, localisés et discontinus sont à l'origine de la formation de petits abrupts semi-circulaires (« loupes de glissement ») qui se développent à partir de ruptures de pente importantes, supérieures à 50 %. Ils se produisent, par exemple, à l'intersection du plan incliné du versant et de la paroi abrupte d'une gorge ou à la suite d'une discontinuité lithologique. Les processus dus au ruissellement ont

peu d'impact grâce à la bonne couverture végétale, et les excédents d'eau se concentrent rapidement dans les très nombreuses gorges, témoins des débâcles interglaciaires. En milieu plus sec (précipitations inférieures à 1 500 mm/an), le ruissellement semble plus développé car le modelé est creusé, sur le pourtour des gorges, par un réseau dense de ravines. Ces manifestations, ainsi que celles plus localisées de déflation d'origine éolienne, restent cependant normales et conformes à ce type de climat. On observe, en effet, de petites accumulations de sable volcanique (« rebdous » ou « nebkas ») piégées contre les parois rocheuses ou par la végétation ainsi que des « yardangs » de taille moyenne. À partir de 4 000-4 200 m intervient l'influence du système périglaciaire dont l'action reste cependant limitée en raison de la situation équatoriale de cette montagne où le rythme des alternances gel-dégel est plus sensible aux amplitudes diurnes qu'au changement de saison (champs de « thufurs », reptation lente du sol).

Les mutations agraires et la délocalisation du minifundio

Durant près de cinq siècles, les structures agraires, héritées de la conquête espagnole, ont peu évolué et sont restées figées sur le modèle de l'hacienda dominant un minifundio assujéti. Au cours des trente dernières années, ces structures ont éclaté avec l'installation du minifundio sur les versants et les hautes terres. Face au mécontentement social alimenté par une forte croissance démographique (la population a été multipliée par dix en un siècle), mais aussi avec l'émergence pour l'État équatorien d'autres centres d'intérêt (cultures d'exportation sur la côte et pétrole amazonien), une loi de réforme agraire est promulguée en deux fois, 1964 et 1974. Celle-ci abolit l'état de servitude (le *huasipungo*) auquel est soumise l'abondante main-d'œuvre des haciendas et demande aux grands propriétaires terriens de renoncer à leurs privilèges féodaux et de faciliter la cession de terres au petit paysannat. Le *huasipungero* devient donc un homme libre et propriétaire d'un terrain mais dans des conditions particulièrement difficiles. En effet, les *hacendados* bloquent l'attribution des bonnes terres (bassins et bas de versant), même non utilisées, et provoquent ainsi un transfert massif de population vers les versants puis les hautes terres. Le processus de mutation est en cours ; dès le départ il confine le minifundio à la marginalité : d'un point de vue agronomique d'abord, car la nature est plus contraignante à cette altitude que dans les zones plus basses (1 500-3 000 m) où le petit paysan avait appris à cultiver la terre ; d'un point de vue socio-économique ensuite, considérant que ces hautes terres sont éloignées des circuits commerciaux traditionnels et difficiles d'accès (DE NONI, 1986).

La « délocalisation » du minifundio en altitude a contribué à modifier profondément les caractéristiques initiales de la végétation naturelle ainsi que le mode de fonc-

tionnement de l'écosystème. Cette évolution a donné lieu à la création d'un damier très dense de parcelles de culture de subsistance, la vente au marché n'étant envisagée qu'exceptionnellement, lorsqu'il y a des surplus de récolte. L'élevage est peu répandu car, face au manque de terres, il est pratiqué sur des terres de parcours en indivision ; en outre, son développement est tributaire d'investissements de capitaux qui ne sont pas actuellement disponibles dans le minifundio. Les surfaces cultivées sont en général inférieures à 20 ha, la taille moyenne étant de l'ordre de 5 ha et la parcelle unitaire dépassant rarement 1 ha. Il n'y a aucune limite de pente pour cultiver, si ce n'est l'absence de sol sur le versant. En fonction du gradient altitudinal, on peut distinguer plusieurs grands types de terroir (DE NONI et VIENNOT, 1990).

Les terroirs de versant (entre 3 000-3 200 m et 3 600 m) sont identifiables dès que la pente augmente (plus de 20 %), au-dessus des glacis-terrasses ou des cônes de déjections qui forment contact avec les bonnes terres des bassins. La culture principale est le maïs, associé fréquemment au haricot grimpant et plus localement à la fève, entre 3 000 et 3 200 m. Plus haut sur le versant, le minifundio est tout aussi dense et oriente sa production vers l'orge, la pomme de terre, la fève, le lupin, le quinoa, et localement l'oignon ; car le maïs a dépassé sa limite altitudinale maximale. Le minifundio continue l'installation de nouvelles parcelles malgré le compartimentage de certains versants en un réseau dense de profondes gorges (des pentes dépassant 70 %, voire de 100 %, et des sols peu épais).

À partir de 3 600 m, sur les hautes terres, les cultures avancent progressivement. C'est un monde en pleine mutation où ne cesse de s'étendre, tant qu'il y a de l'espace, la frontière agricole. Le réseau de parcelles est moins dense pour l'instant que sur les versants plus bas et la pomme de terre est cultivée jusqu'à 3 800 m. Pour les plus nantis, on observe localement la présence d'un élevage extensif d'ovins et de caprins, parfois de lamas, qui atteint 4 400 m. Bien que les pentes soient un peu moins fortes (inférieures à 40 %), les conditions climatiques y sont plus rudes. L'habitat est exclusivement indigène et les parcelles sont de petite taille.

Sur la carte du bassin de Cayambe (fig. 1) élaborée à partir de cartes thématiques et de photographies aériennes couvrant pratiquement une période d'un demi-siècle, la légende met en relief les conséquences des mutations agricoles sur les versants et les hautes terres. On note clairement que le minifundio occupe massivement, à partir de 3 000-3 200 m, les terroirs de versant cédés par les haciendas durant la réforme agraire, celles-ci se cantonnant sur les bonnes terres du bassin (2 800-3 000 m). On remarque, enfin, que le minifundio progresse en altitude, jusqu'à 3 600 m, aux dépens des formations végétales naturelles, *matorral* et *páramo*.

LES CONSÉQUENCES DES MUTATIONS SUR LES HOMMES ET LE MILIEU

Sur les hommes

La Sierra est la région du pays où la pression de l'homme sur la terre est la plus forte. Les études de distribution de la population (DELAUNAY, 1989) montrent en effet que c'est dans la Sierra que l'on observe les plus fortes densités rurales. Celles-ci peuvent varier de 50 habitants au kilomètre carré à plus de 200 habitants, comme par exemple dans la région d'Ambato (province de Tungurahua).

En règle générale, les fortes densités de population correspondent au minifundio. Les recensements agricoles réalisés par le ministère de l'Agriculture permettent de regrouper les unités de production par grande classe de taille et d'évaluer leur importance en nombre et en superficie. Les principales données existantes ont été regroupées dans le tableau I.

TABLEAU I

La structure agraire en Équateur de 1954 à 1985 :
nombre d'exploitations et superficie
(en pourcentage de la superficie totale)
*Farming structure in Ecuador (1954 to 1985) : number of farm
and area (in percent of the total area)*

Taille en hectares	1954		1974		1985	
	nombre	superficie	nombre	superficie	nombre	superficie
< 20	90	17	85	18	84	21
20 - 100	8	18	13	34	15	44
> 100	2	65	2	48	1	35

On remarquera que, quelles que soient les années considérées, les petites propriétés, de 0 à 20 ha, sont largement majoritaires : elles regroupent plus de 80 % des unités de production. Ces données montrent également une inégalité très marquée dans la distribution des superficies par taille d'exploitation, le minifundio n'occupant guère dans le meilleur des cas, en 1985, que 20 % des terres agricoles, ce qui entraîne une pression d'autant plus forte de l'homme sur le sol.

L'occupation actuelle des sols est un bon indicateur de l'inégalité qui oppose haciendas et minifundios depuis la réforme agraire, et révèle une situation agronomique paradoxale. D'une part, on trouve les haciendas qui sont tournées principalement vers l'élevage et qui sont installées sur les terres planes, facilement exploitables, des bassins interandins. Leur gestion du cheptel bovin est très extensive et vise à occulter la présence de terres inexploitées afin d'éviter l'extension du minifundio dans cette partie de la Sierra : c'est ainsi que le nombre de têtes par hectare est passé de 1,1 en 1972 à 0,7 en 1985 alors que, pendant la même période, la superficie des pâturages aug-

mentait considérablement. D'autre part, on constate, avec la mutation du minifundio en altitude, que les cultures ont disparu quasi complètement des bassins et se trouvent dorénavant sur les versants et les hautes terres, où l'agriculture est confrontée à des contraintes agronomiques importantes.

Malgré les efforts du petit paysannat pour orienter le minifundio vers les cultures alimentaires de base — céréales (maïs, blé et orge) et tubercules (pomme de terre) —, la situation actuelle est précaire. Selon les régions, l'autoconsommation est à peine garantie ; quant aux excédents de production, ils sont rares et tributaires d'une année agricole exceptionnelle et ils se heurtent parfois, comme nous le verrons ci-après pour le blé, à des systèmes de subventions gérés par l'État. Les données du ministère de l'Agriculture sur l'évolution de la production agricole au cours des quinze dernières années illustrent parfaitement cet état de crise (tabl. II).

TABLEAU II
La production agricole dans la Sierra de 1970 à 1985
(en milliers de tonnes)
Agricultural production in the highlands from 1970 to 1985
(in thousands of metric tons)

Cultures	1970	1975	1980	1985
Orge	79	63	24	27
Maïs	168	90	45	35
Blé	81	64	31	18
Pomme de terre	542	499	323	423

On notera que la baisse de la production agricole est générale et vertigineuse pour toutes ces cultures entre 1970 et 1980. Elle est moins marquée entre 1980 et 1985, période durant laquelle on observe même une légère reprise de la production d'orge et un accroissement net pour la pomme de terre. Il semblerait que le palier inférieur de production ait été atteint par ces deux cultures au cours de la décennie précédente. Par contre, la production de maïs continue à décroître et la chute de celle du blé est toujours aussi spectaculaire, même si cela peut s'expliquer par un transfert vers l'amont de l'agriculture vivrière. Cette dernière culture, par exemple, a subi les contrecoups de choix politiques qui ont nui aux intérêts du minifundio. Au cours de la décennie passée, l'État a opté pour une politique d'importation de blé en provenance des USA et de subventions des grains auprès des distributeurs locaux. En 1985, la tonne de blé en provenance des USA coûtait 21 351 sucres (1 dollar = 120 sucres à cette époque) à l'État équatorien qui le revendait aux distributeurs locaux à 11 942 sucres. L'État prenait donc à sa charge une subvention de 9 409 sucres, soit 44 % du prix initial de la tonne (PELTRE-WURTZ, 1989).

Le minifundio ne peut lutter devant une telle disparité et éprouve, dans ce contexte, d'énormes difficultés pour s'affranchir de la misère et de la dépendance alimentaire. On estime que 90 % environ des familles du minifundio se trouvent dans des conditions de « pauvreté absolue » (moins de 2 500 calories et 45 grammes de protéines par personne et par jour).

Sur le milieu

Confrontés, sur des parcelles en général exiguës, à des contraintes naturelles importantes, les hommes du minifundio sont tenus, pour survivre, de travailler très intensivement le sol. Dans ces conditions, l'érosion anthropique se développe très rapidement et elle est d'autant plus active qu'elle se manifeste dans un milieu non aménagé.

L'étude cartographique réalisée conjointement par l'Orstom et le ministère équatorien de l'Agriculture sur « Les principaux processus d'érosion en Équateur » (ALMEIDA *et al.*, 1984), permet d'estimer que globalement 50 % de la superficie du pays est affectée par des processus de dégradation. La Sierra est la région la plus touchée, en particulier les zones situées sur les versants et les hautes terres des cordillères où se développe une érosion active, par ruissellement concentré, à mesure que se déplace le front de colonisation agricole.

En 1986, l'Orstom a participé à l'installation de stations de mesure du ruissellement sur des sols agricoles (DE NONI *et al.*, 1986, 1989-1990). Parmi les sites d'étude, ceux de Riobamba et de Mojanda sont représentatifs des conditions que connaissent les communautés agricoles organisées en minifundio. La station de Riobamba est située à Tuntacta, à 3 400 m d'altitude, sur une portion de versant dominée par les glaciers du grand volcan Chimborazo (6 310 m). Les sols, d'origine volcanique, se sont formés à partir de pyroclastites, de coulées ou de matériaux morainiques et dans des conditions de climat tempéré froid et humide. Ce sont des sols sablo-limoneux riches en verres à profil peu différencié A/C, pauvres en matière organique, désaturés en A et au sommet de C = andosols vitriques à horizon A désaturés (QUANTIN, 1992) ou lithic Udivitrands (Soil Survey Staff, 1975 ; ORTIZ-SOLORIO, 1990). Ils ont une capacité de rétention en eau de l'ordre de 20 %, une densité apparente faible mais supérieure à 1 ; à peine structurés, ils sont sensibles à l'érosion éolienne dans les zones à microclimat plus sec.

La station de Mojanda est localisée à Santa Mónica, à 3 300 m d'altitude. Elle est installée sur le versant oriental d'un vieil édifice volcanique qui culmine à près de 4 500 m ; en contrebas s'étendent les haciendas d'élevage du bassin de Quito-Cayambe. Les sols sont également d'origine volcanique et développés sous climat tempéré froid et humide, riches en matière organique. Ce sont des mollisols argileux épais formés aux dépens de cendres et ponces, ils sont riches en halloysites = sols brunifiés des

pays tropicaux, sols bruns dystrophes andiques ou halloy-sitic Argiudolls, et situés entre des Melanudands à l'amont (au-dessus de 3 500 m) et des mollisols à montmorillonite à l'aval (en dessous de 3 000 m). Ils ont une capacité de rétention en eau supérieure à 20 %, une densité apparente proche de 1 ; ils sont bien structurés en agrégats stables de 0,5 cm qui deviennent millimétriques sous culture et en cas de dessiccation.

À Riobamba comme à Mojanda, les unités de production familiales ont une superficie comprise entre 1 et 5 ha et occupent des terroirs de versant dont la pente est en général supérieure à 40 %. Elles sont morcelées en champs de quelques ares à un hectare où plusieurs systèmes de tenure coexistent. C'est le domaine du minifundio, avec sa mosaïque typique de petites parcelles irrégulières, son aspect hétérogène dû à la coexistence de nombreuses cultures vivrières (souvent au sein de la même parcelle) et de prairies naturelles, parfois pâturées. Les parties boisées sont réduites et l'on note dans le même temps une disparition du *matorral* qui n'occupe plus que les zones éloi-

gnées, trop déclives ou non cultivables. En outre, on constate, de façon généralisée et préoccupante, la disparition des limites du parcellaire, afin d'optimiser les labours au tracteur dont l'utilisation ne semble guère justifiée, au demeurant, sur ces fortes pentes. Au-dessus de 3 800-4 000 m, le *páramo* est largement prédominant mais laisse entrevoir néanmoins l'introduction localisée de parcelles de culture.

Pour mesurer l'érosion sur les sites de Riobamba et de Mojanda, les stations sont équipées de parcelles de ruissellement de 100 m² (5 m x 20 m). Elles sont de deux types : parcelle sur labour à plat, sans culture, pour simuler, quelle que soit la saison, le comportement du sol au moment du semis dans un environnement où la culture est continue et la jachère très irrégulière (situation proche du protocole défini par WISCHMEIER et SMITH, 1978) ; parcelle sous culture traditionnelle : pomme de terre, orge et fève. Les données obtenues apparaissent dans le tableau III. Ces résultats appellent plusieurs remarques.

TABLEAU III
Pertes en terre (t/ha), période 1986-1990
Sediment loss (t/ha) from 1986 to 1990

Année	Mojanda			Riobamba		
	Pluviosité annuelle (mm)	Pertes en terre (t/ha)		Pluviosité annuelle (mm)	Pertes en terre (t/ha)	
		sol cultivé	sol nu		sol cultivé	sol nu
1986 - 87	669	1,2	5,6	724	1,7	66,7
1987 - 88	843	0,7	113,7	751	52,6	179,6
1988 - 89	1 246	0,4	115,3	997	6,2	19,8
1989 - 90	815	0,1	166,3	501	9,6	48,5

Les effets de l'érosion sont manifestes :

— sur le sol cultivé, l'érosion est faible à Mojanda (< 1 t/ha/an), modérée à forte à Riobamba (2 à 10 et même 52 t/ha/an) ;

— sur le sol nu, l'érosion est très forte à Mojanda (atteignant 110 à 170 t/ha/an), très forte également à Riobamba (50 à 180 t/ha/an).

L'irrégularité interannuelle des manifestations érosives est générale : les résultats montrent des variations considérables d'une année à l'autre. C'est ainsi que, par rapport à 1986-1987, on observe en 1987-1988 trente fois plus de terre perdue à Riobamba sur le sol cultivé et, pour la même période, vingt fois plus de terre perdue à Mojanda sur le sol nu.

Pour une pente moitié moins déclive, l'érosion et le ruissellement annuels sur le sol cultivé peuvent être plus forts à Riobamba ; pour l'année 1987-1988, l'érosion est de 53 t/ha/an avec un coefficient de ruissellement (K) de 15 % ; à Mojanda, en revanche, l'érosion ne dépasse pas 1 t/ha avec un K de 1 % ; cependant, sur le sol nu, les pertes en terre cumulées pour la période sont supérieures à Mojanda : respectivement 402 t/ha contre 315 t/ha.

Le sol de Riobamba est donc plus érodible que celui de Mojanda, mais les pluies sont plus érosives à Mojanda qu'à Riobamba.

Pour expliquer cette situation, il est nécessaire d'évaluer pour ces deux sols, d'une part, leur comportement intrinsèque (« érodibilité ») à l'agressivité de la pluie (« érosi-

« vité ») et, d'autre part, l'influence des pratiques culturales (« érodabilité ») sur leur comportement. En premier lieu, dans l'hypothèse où l'on établit une possible liaison entre érosivité et érodabilité, nous avons regroupé, dans les tableaux IV et V, les pluies par classe d'intensité maximale durant 30 minutes (I_{30}) :

TABLEAU IV
 Nombre de pluies, période 1986-1990, classées par intensité en 30 minutes
Number of rainfall (1986 to 1990) at Mojanda sorted according to 30 minutes maximum intensities

MOJANDA											
Classe mm	1 5	5 10	10 15	15 20	20 25	25 30	30 35	35 40	40 45	45 50	Intensité maximale (mm/h)
1986 - 87	40	17	8	2						1	53,8
1987 - 88	112	43	17	3	4	1	2				32,8
1988 - 89	149	52	17	8	3	2	1				33,0
1989 - 90	96	31	11	4	2		1		1		48,8
Total	397	143	53	17	9	3	4		1	1	53,8

TABLEAU V
 Nombre de pluies, période 1986-1990, Mojanda, classées par intensité maximale en 30 minutes
Number of rainfall (1986 to 1990) at Riobamba sorted according to 30 minutes maximum intensities

Riobamba											
Classe mm	1 5	5 10	10 15	15 20	20 25	25 30	30 35	35 40	40 45	45 50	Intensité maximale (mm/h)
1986 - 87	23	7	2	1	2	1					26,0
1987 - 88	110	37	11	7	3	3	2				34,2
1988 - 89	80	26	8	5	5						24,4
1989 - 90	47	6	6	5		1					40,8
Total	260	76	27	18	10	5	2				40,8

Globalement, pour les deux sites, les intensités sont faibles : elles se regroupent massivement dans les classes inférieures à 10 mm ; seules quatre pluies sont supérieures à 35 mm à Mojanda et aucune à Riobamba. Ces valeurs ne permettent donc pas d'attribuer aux seules intensités le comportement érodible de ces sols. En revanche, l'influence des pratiques culturales associées, tant à Mojanda qu'à Riobamba, à une pression très forte de l'homme sur les sols permet de caractériser le comportement du sol à l'érosion en fonction du type de travail qui lui est appliqué. Sur le sol cultivé, avec un labour profond isohypse, l'érosion ne dépasse pas, pour toute la période, 20 t/ha (2 t/ha à Mojanda et 17,5 t/ha à Riobamba si l'on excepte l'érosion exceptionnelle de l'année 1987-1988). Sur le labour à plat, traditionnellement utilisé par exemple pour l'orge qui fait partie des rotations culturales majeures, l'érosion, pour cette même période, évolue dans le même sens pour

les deux sites et est supérieure à 300 t/ha, soit près de quinze fois plus que sur l'autre traitement. Cela confirme que, parmi les cultures majeures de la zone, l'orge est la plus sensible à l'érosion. Par ailleurs, ces résultats ne correspondent qu'à des épisodes pluvieux ayant provoqué l'exportation de l'eau de ruissellement et de la terre dans les bacs de sédimentation situés au pied de la parcelle et ne prennent pas en compte les déplacements de terre, plus lents, que l'homme peut provoquer en « conditions sèches ». Ce type d'érosion particulier, induit par des labours profonds, manuels ou mécaniques, conduit également, malgré l'absence de pluie, à des déplacements de volumes importants de terre. Des observations complémentaires effectuées à Mojanda, hors des parcelles de 100 m², montrent que les déplacements de terre les plus importants sont à attribuer au travail du sol et qu'ils peuvent être de l'ordre de 40 tonnes par hectare et par an.

LE PROBLÈME DE LA DURABILITÉ DES AGROSYSTÈMES ANDINS

À l'occasion de la conférence sur l'agriculture et l'environnement qui s'est déroulée en 1991 aux Pays-Bas, la FAO a rappelé que depuis des millénaires la survie des populations dépend de l'agriculture et que la croissance démographique, qui concerne particulièrement les pays en développement, conduit à une utilisation de plus en plus poussée de l'environnement naturel et à une accélération des processus de dégradation des ressources naturelles. Il en résulte que l'agriculture, dans de nombreuses régions de la planète, ne peut plus remplir sa fonction majeure qui est de fournir aux populations des produits alimentaires de base et un revenu agricole stable. Pour répondre à cette question, la FAO propose le concept d'ADR (Agriculture et développement rural durables) qui recouvre la définition suivante : « Il faut, pour un développement durable, aménager et conserver les ressources naturelles et orienter les changements techniques et institutionnels de manière à satisfaire les besoins des générations actuelles et futures (dans les secteurs de l'agriculture, des forêts et de la pêche). » En d'autres termes, il s'agit d'utiliser la terre à des fins « socialement acceptables et économiquement viables » tout en préservant les ressources « sol et eau » qui sont la base de la production végétale pour les générations actuelles et futures.

La question de la durabilité des agrosystèmes andins s'insère totalement dans cette problématique. Dans la mesure où l'érosion, en dégradant les sols, provoque la baisse des rendements et du niveau de vie des paysans, l'identification de stratégies adaptées à ce problème est liée à une approche intégrée mettant en jeu des indicateurs pertinents de gestion du milieu. La durabilité de ce milieu est fonction de la prise en compte, dans les solutions préconisées, de trois aspects essentiels d'appréciation se situant au plan technique, social et économique.

Dans cet esprit, de nouvelles parcelles de ruissellement ont été installées sur les stations de Mojanda et de Riobamba, afin d'étudier les manifestations de l'érosion en conditions de culture traditionnelle améliorée par des ouvrages simples de conservation. Ces parcelles sont plus grandes que les précédentes (1 000 m² de surface, 50 m x 20 m), ce qui permet d'évaluer, dans un contexte spatial raisonnable, le comportement des ouvrages à l'érosion et de tester ainsi, en vraie grandeur, l'impact technique, social et économique de ces derniers.

En ce qui concerne l'impact technique, une enquête socio-agronomique de terrain ayant conclu à l'absence quasi généralisée de pratiques conservatoires, il a été décidé d'opter pour des ouvrages conçus selon les critères suivants :

- un tracé selon les courbes de niveau car, sur ces terroirs aux fortes pentes, l'objectif premier est de briser l'énergie du ruissellement ;

- une structure simple de microbarrages perméables (ROOSE *et al.*, 1994), évoluant progressivement et naturellement en pseudo-terrasses afin de réduire le temps de travail consacré par l'agriculteur à ce type d'activité.

Les données obtenues en utilisant ces techniques durant toute la période sont encourageantes car la diminution de l'érosion est notable. Les poids de terre sont minimaux et l'érosion admissible, en général inférieure à 8 t/ha/an et le plus souvent voisine de 1 t/ha/an. Par exemple, à Riobamba, pour la période allant du 20 septembre au 12 novembre 1987 (date de semis), trois pluies érosives ont donné lieu à 33,8 t/ha de terre perdue sur la parcelle en culture traditionnelle de 100 m², alors que, pour ces mêmes dates et avec un labour identique, l'érosion sur la grande parcelle améliorée n'est que de 1,1 t/ha.

En ce qui concerne l'impact social, afin de garantir le transfert de ces techniques vers l'utilisateur potentiel, il y a eu insertion dans la logique paysanne locale, par l'utilisation des matériaux autochtones dont l'agriculteur maîtrise traditionnellement le façonnement. Dans cet esprit, on s'est inspiré des types de matériaux qu'emploient les paysans pour entourer leurs propriétés : on distingue, par exemple, les murets en mottes de terre ou en blocs de cendre volcanique indurée (Mojanda) et, plus simplement, les bandes enherbées avec du pâturage ou une culture, quinoa ou lupin (Riobamba).

Quant à l'impact économique, il intervient à un double niveau : dans le coût des techniques et dans l'amélioration des rendements. À l'évaluation des coûts, pour les cinq années culturales considérées (tabl. VI), on constate que les coûts globaux et cumulés sont très bas et varient entre 1 000 et 2 000 FF à l'hectare pour cinq ans. On peut donc estimer que des investissements de ce type sont accessibles au paysannat local et constituent, par ailleurs, une référence concrète pour décider l'État à intervenir dans la gestion durable de cet agrosystème.

Cela étant, ces données n'ont qu'une valeur relative dans la mesure où le minifundio pratique, de manière ancestrale, le travail communautaire qui permet de mobiliser un groupe de villageois pour effectuer des tâches d'intérêt général sur toutes les parcelles de la commune. Dans ce cas, le travail n'a plus de coût chiffré et l'investissement est quasi nul ou réduit au minimum, comme dans le cas des bandes enherbées où il se résume à l'achat de quelques semences.

Quant aux rendements, on constate qu'ils sont sensiblement supérieurs : par exemple, à Mojanda, la récolte de pomme de terre a été de 4,3 t/ha sur la parcelle témoin et de 7,6 t/ha sur la parcelle expérimentale ; de même pour la récolte de fève, où l'on obtient respectivement 1,1 t/ha et 9 t/ha.

Néanmoins, ce bilan, globalement satisfaisant, ne concerne que la partie des terres située au-dessus de 3 200 m où l'érosion est récente et n'a pas encore dégradé de façon

TABLEAU VI
Coûts de construction et d'entretien des ouvrages, période 1986-1990
Cost for construction and maintenance of soil conservation works (1986 to 1990)

Année	Talus en mottes herbeuses « chambas »			Murets en blocs de cendre indurée			Bandes enherbées	
	Nombre de jours-homme (j/h) et type de travaux	Coût (sucre) pour 20 m linéaires	coût / ha (sucre)	Nombre de jours-homme (j/h) et type de travaux	Coût (sucre) pour 20 m linéaires	Coût / ha (sucre)	Nombre de jours-homme (j/h) et type de travaux	Coût / ha (sucre)
1	1j/h piochage 2j/h pose de 2 rangs	2 625	131 250	2j/h défonçage 3j/h transport + pose de 2 rangs	4 375	218 750	3j/h tracé des bandes et semis	46 000 dont 25 000 semences
2	idem	2 625	131 250	idem	4 375	218 750	2 j/h entretien + 3 coupes par an	84 000
3	1j/h piochage 1j/h pose de 1 rang	1 750	87 500	1j/h défonçage 2j/h transport + pose de 2 rangs	2 625	131 250		84 000
4	idem	1 750	87 500	idem	2 625	131 250		84 000
5	1j/h entretien		21 000	1j/h entretien		31 000		84 000
Coût total pour la période		458 500 soit 1 310 FF		721 000 soit 2 060 FF			382 000 soit 1 091 FF	

irréversible l'équilibre de l'écosystème. En fait, l'érosion anthropique a débuté en deçà de 3 200 m, dans le bassin interandin et sur les parties basses des versants, en liaison avec l'installation des premières vagues de migrants. Elle a provoqué le décapage du sol sur de grands espaces et le départ des agriculteurs vers les régions hautes. Actuellement, 20 % (3 000 km² environ) de la surface de la région volcanique interandine sont occupés par une cendre volcanique indurée, la *cangahua*, stérile en l'état pour l'agriculture. Des essais de réhabilitation, menés parallèlement en Équateur et au Mexique, où l'on retrouve une formation « *tepetate* » aux caractéristiques très proches de celles de la *cangahua*, montrent qu'il est possible de récupérer ce matériau pour la culture (DE NONI *et al.*, 1994). Pour rendre un sol de nouveau apte à la culture et obtenir des rendements corrects, il est nécessaire :

— de pulvériser le sol induré (pour le moins sur une vingtaine de centimètres) et d'installer sur la parcelle des ouvrages conservatoires pour freiner le ruissellement car l'horizon résultant de cette opération est devenu pulvérulent et très érodible ;

— de corriger par une fertilisation chimique les carences initiales de ces sols en azote et en phosphore.

Le coût global d'un projet de réhabilitation de ce type est bien plus élevé qu'une opération de conservation des sols, mis à part la construction et la gestion des ouvrages conservatoires (murets en blocs de *cangahua*) dont le coût est équivalent aux estimations affichées dans le tableau VI. L'augmentation de coût est due principalement aux tra-

voux de pulvérisation qui nécessitent sur de grandes surfaces l'utilisation d'engins mécaniques, et à l'achat de fertilisants. Au Mexique, on estime qu'il faut huit années normales de culture pour que l'agriculteur puisse amortir les dépenses correspondantes (QUANTIN, 1992). Pour les petits agriculteurs, l'aide de l'État est absolument nécessaire pour garantir, à l'échelle régionale, le succès des projets de réhabilitation.

L'installation du minifundio sur les versants et les hautes terres andines pose le problème de la durabilité de ces nouveaux agrosystèmes car l'érosion accélère, depuis deux décennies, la dégradation des ressources naturelles au détriment des générations actuelles et futures. Cette situation n'est pas seulement le résultat des contraintes naturelles imposées à l'homme par le massif montagneux des Andes, elle est aussi la conséquence de l'évolution sociale et historique du pays, qui s'est traduite par la mutation et la délocalisation du minifundio en altitude. Dans le contexte actuel, l'extension spatiale des phénomènes de dégradation est rapide et fait diminuer à mesure l'espérance de durabilité de ces agrosystèmes. Aussi, afin d'éviter d'avoir recours, comme pour les terres de *cangahua* situées plus bas, à des aménagements coûteux de réhabilitation, il est nécessaire d'intervenir avant qu'il ne soit trop tard et d'engager à cet effet une véritable concertation entre « minifundistes », chercheurs-techniciens et décideurs politiques. Ce n'est qu'à ce prix que l'État équatorien pourra s'engager et s'investir aux côtés du petit paysannat pour constituer une agriculture durable de montagne.

BIBLIOGRAPHIE

- ALMEIDA (G.), DE NONI (G.) *et al.*, 1984 — *Los principales procesos erosivos en Ecuador*. Quito, Pronareg-Pronacos-Orstom, 31 p.
- DELAUNAY (D.), 1989 — « Espacios demográficos y redes migratorias ». Quito, Corporación Editora Nacional/Colegio de Geógrafos del Ecuador, coll. Études de géographie : 71-98.
- DE NONI (G.), 1986 — *Breve historia de la erosión en el Ecuador*. Quito, Cedig-Orstom, Documentos de investigación, 6 : 15-23.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), 1985 — Estudio de algunos procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador (3 200 m-4 800 m). *Revista Colombiana de la Ciencia del Suelo*, 16 (1) : 23-31.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), 1989 — Le projet DNA-Orstom sur l'étude de l'érosion et des pratiques de conservation des sols en Équateur. *Bull. Réseau Érosion*, 5 p.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), 1990 — « De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain : la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes ». In : *Colloque sur les sociétés rurales de montagne (Andes et Himalaya)*, CNRS-Université de Grenoble : 61-65.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), TRUJILLO (G.), 1986 — L'érosion et la conservation des sols en Équateur. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 235-245.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), TRUJILLO (G.), 1989-1990 — Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Équateur. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 183-196.
- DE NONI (G.), JANEAU (J.-L.), PRAT (C.), TRUJILLO (G.), VIENNOT (M.), 1994 — « Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Équateur, Mexique et Nicaragua) : impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole ». In : *15^e Congrès mondial de la science du sol*, vol. 6 a, ISSS-MSSS, Acapulco, Mexico : 554-570.
- ORTIZ-SOLORIO (C. A.), 1990 — *Claves para la taxonomía de suelos*. (Traduction : Agriculture Handbook n° 436, complété pour les andisols). Montecillo, Mexicó, CP et IMTA, 576 p.
- PELTRE-WURTZ (J.), 1989 — « El pan que comemos es estadounidense ». Quito, Corporación Editora Nacional/Colegio de Geógrafos del Ecuador, coll. Études de géographie : 7-16.
- QUANTIN (P.), 1992 — *Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Étude de la pédogenèse initiale en milieu tropical*. Paris, Orstom, coll. Études et thèses, 498 p.
- QUANTIN (P.), 1992 — *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des bassins de Mexico et de Tlaxcala (Mexique), en vue de leur réhabilitation agricole*. Rapport scientifique final, contrat CEE, 77 p.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- Soil Survey Staff, 1975 — *Soil Taxonomy*. Washington, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook n° 436, 754 p.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1978 — *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Washington, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook n° 537, 58 p.

Restauration de la productivité des sols semi-arides par le zaï.

Village de Gourga, province du Yatenga, au Burkina Faso : 159-173

Photos : E. Roose

Sur une terre dégradée (zipellé = terre érodée, encroûtée, blanchie), l'Oxfam a testé la méthode traditionnelle mossi du zaï qui comprend une structure de gestion des eaux de ruissellement (fascine, cordon de pierres ou d'herbes), le creusement de cuvettes pour capter une partie du ruissellement et l'enfouissement localisé de fumier sous un poquet de sorgho ou de mil.



À la suite du défrichage, des labours et des cultures extensives minières se développent des clairières désertifiées au beau milieu de la savane-parc à karité (zipellé).

Pour récupérer ces terres dégradées, les paysans mossi ont installé une haie d'herbes et de branchages, et cultivé le sorgho dans des cuvettes qu'ils vont retravailler et fertiliser.

La pratique du zaï est limitée par différents paramètres : la répartition des pluies (300 à 800 mm), la disponibilité en main-d'œuvre pour creuser la terre compacte en saison sèche (350 h /ha) et pour aménager des cordons antiérosifs perméables (10 à 15 t/ha de pierres), la capacité de produire et de transporter 3 t/ha/an de fumier ou de compost.



Certains paysans ont constaté que le fumier (poudrette non fermentée) apporte des adventices mais aussi les graines d'une douzaine d'arbustes fourragers qu'ils ont protégés parmi les tiges de céréale. Cette méthode peu coûteuse permet de réinstaller un système agro-sylvo-pastoral durable en milieu semi-aride.



Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » au Mexique : 175-185

Photos : P. Quantin

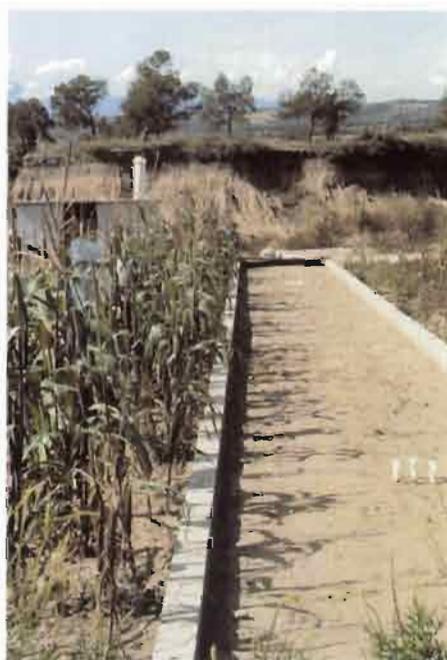


Paysage de sols à tepetate et sols érodés, piémont ouest de la Sierra Nevada, vallée de Mexico.

Tepetate mis à nu par l'érosion, près de Texcoco, vallée de Mexico.



Érosion en « barranca » de sol à tepetate, vallée de Mexico.



Couple de parcelles de tepetate cultivé, à nu (type Wischmeier) et sous maïs, pour mesure de l'érosion, Tlalpan, Tlaxcala, Mexique.



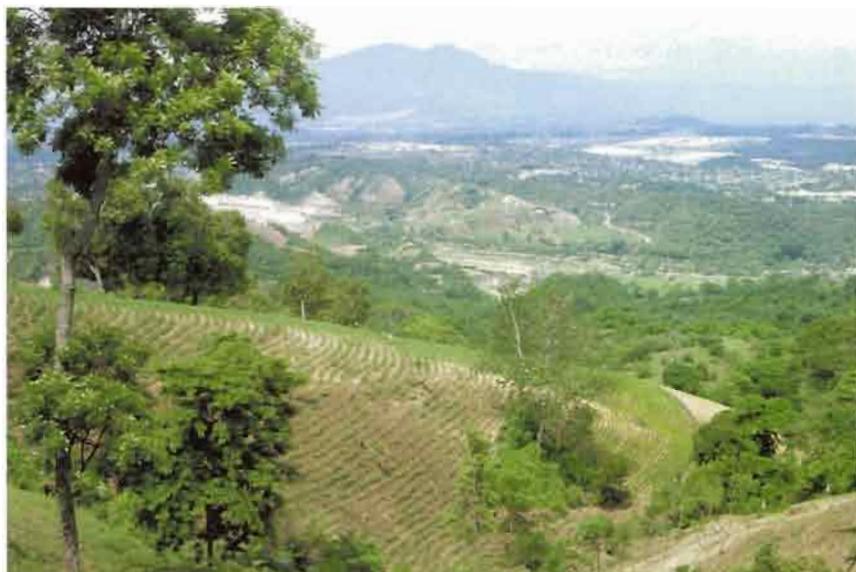
Mesure du ruissellement et de l'érosion sur une terrasse de tepetate cultivé, près de Texcoco, vallée de Mexico.



Défonçage du tepetate par passage croisé de sous-soleuse à dent (ripper).

Restauration des sols volcaniques par apport de matières organiques au Salvador dans le bassin versant de Las Canas : 187-201

Photos : J. Collinet



Paysage de collines recouvertes de sols fertiles sur cendres volcaniques. On remarque à l'avant-plan le versant raide cultivé en tabac sur billons isohypses.



Colline mise en culture au-dessus d'un fossé d'absorption totale des eaux de ruissellement. Fond de vallée en V densément arboré.



Versant raide labouré par des bœufs tirant une araire. Cette technique culturale ne permet pas d'enfourer totalement les herbes de la jachère : les mottes ainsi protégées par les racines résistent mieux à la battance des pluies.



État de surface du sol cendré restauré par apport de matières organiques : début de structuration en juin 1993, à l'issue de trois cultures (MNFS).

Gestion de l'eau et des matières organiques sur les versants raides : projets Salagnac et Jacmel en Haïti : 229-252

Photos : E. Roose



Pour valoriser les produits paysans en ville et protéger les bonnes terres du ruissellement provenant des hautes terres dégradées, le projet a conçu un système de pistes bétonnées qui conduisent les eaux excédentaires vers des citernes construites et gérées par des groupes paysans. Ces eaux dangereuses servent dorénavant aux ménages, au bétail et à l'irrigation de petits jardins potagers.

Grâce à la récupération des eaux de pluie sur les toits, les ménages disposent d'une réserve d'eau claire qui permet d'améliorer l'hygiène familiale, de réduire la corvée d'eau, d'élever du bétail en stabulation, de produire du fumier de qualité et d'arroser le jardin.



Compte tenu de la pression foncière, la durée de la jachère est courte. Mais avant le labour, le bétail au piquet transforme sur place les herbes fourragères ainsi qu'un complément de résidus de culture. Le sol ainsi fumé (sans transport) et tassé donne, après labour, un lit de semence plus résistant à l'érosivité des pluies.



Après un sarclage, les herbes sèches sont enfouies sous une butte de terre meuble où elles vont se décomposer rapidement (aucun transport). Cette butte sera complantée en maïs, haricots et manioc disposés selon leur besoin de fertilité, de lumière et d'espace.



Les terres caillouteuses épuisées sur calcaire (rak) sont abandonnées à la jachère pâturée. Le ruissellement et les terres érodées qui s'en échappent sont

récupérés en amont des seuils en pierres sèches (ou en sacs de plastique remplis de terre) qui bloquent les ravines. Ces sédiments sont alors fumés et plantés de bananiers, de divers arbres fruitiers, de canne à sucre et d'herbes fourragères qui calment les eaux et forment les « jardins de ravine ».



Impact des minifundios d'altitude sur la durabilité des agrosystèmes andins : 277-288

Photos : G. De Noni



Station de Riobamba (3 400 m), sur des andosols vitriques. La végétation naturelle (*paramo*) a disparu et les cultures (ici récolte de l'orge) montent inexorablement à des altitudes inhabituelles. Au second plan, les neiges pérennes du volcan Chimborazo (6 310 m).



Station de Mojanda (3 300 m), sur des mollisols argileux. L'espace est utilisé par des parcelles de petite taille (ici préparation d'un labour pour le semis de la pomme de terre). Les parties boisées sont réduites alors que, à cette altitude, la végétation naturelle est constituée par une formation arbustive dense et fermée (*matorral*).



En Équateur, où les pierres et les cailloux sont rares et le bois utilisé à des fins domestiques ou de construction, les agriculteurs se servent des bandes enherbées entre les parcelles pour délimiter leurs propriétés.



Dans l'état, ces bandes enherbées sont peu efficaces pour lutter contre l'érosion. Mais lorsqu'elles sont disposées perpendiculairement à la plus grande pente, elles permettent de briser l'énergie du ruissellement et de piéger la plus grande partie de la terre. Le coût d'installation et d'entretien de cette technique est de l'ordre de 1 000 F/ha cumulés sur 5 ans.



Pour réhabiliter une formation volcanique induite comme la *cangahua*, il faut : 1° déliter le matériau en gros blocs (photo), 2° pulvériser ceux-ci pour pouvoir réaliser un lit de semence, 3° corriger par des amendements les carences chimiques initiales.



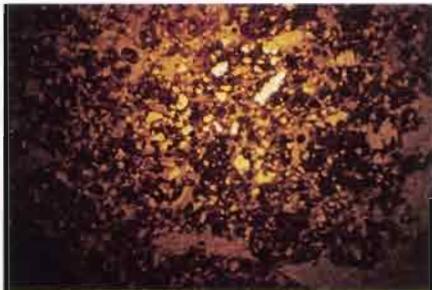
Le coût d'un ouvrage de réhabilitation est bien plus élevé qu'une opération de conservation. Une fois pulvérisée, la *cangahua* devient un matériau très érodible, d'où la nécessité de disposer une partie des blocs sur la parcelle pour créer des micro-barrages perméables.

Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central : 253-275

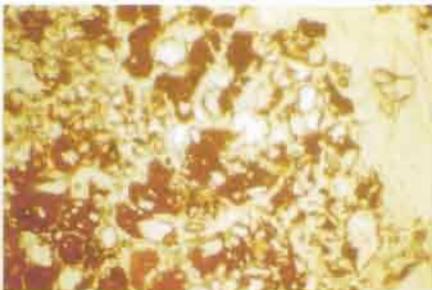
Photographies au microscope optique, en lumière naturelle, de différents horizons correspondant à divers systèmes culturaux des sols ferrallitiques



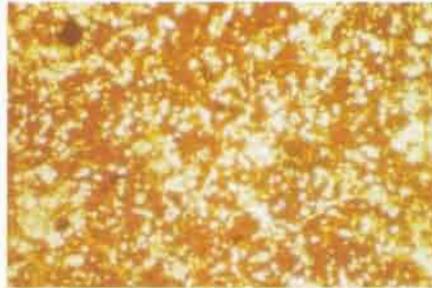
Horizon B_w (138-184 cm) - LSG₀ - Goiânia. Profil de référence, sous jachère ; observation de l'organisation en agrégats subarrondis.



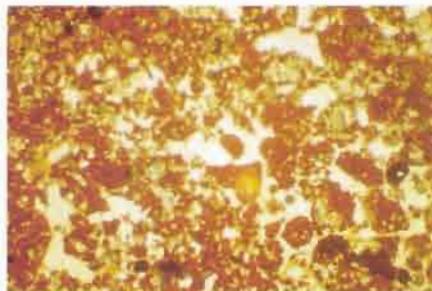
Horizon A_p (9-21 cm) - LSG₀ - Goiânia. Observation de la phase plasmique relativement plus dense que B_w.



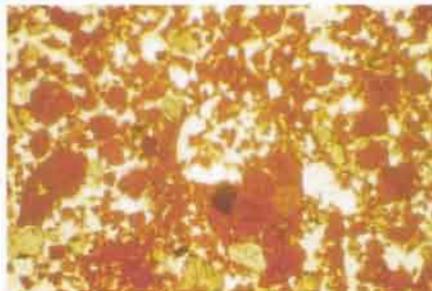
Horizon AB (16-28 cm) - T_{2.4} - Morrinhos. Profil sous végétation naturelle de cerrados ; organisation en microagrégats nettement arrondis.



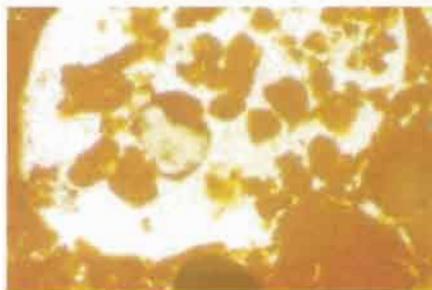
Horizon A_{p2}/A_{Bp} (6-19 cm) PCG₀₁. Système : 1-GP/GP. Transition entre A_{p2} compacté et A_{Bp} moins tassé.



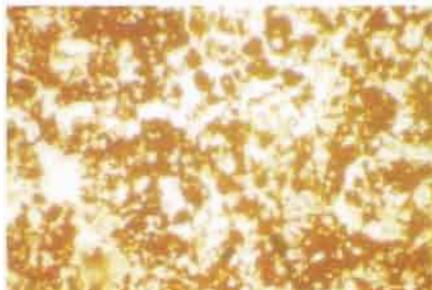
Horizon A_{Bp} (4-25 cm) PCG₀₈. Système : 3-AP/PD. Matériel relativement poreux ; structure microagrégée dense due à l'origine du mélange mécanique à forte activité biologique.



Horizon A_{Bp} (16-24 cm) PCG₁₂. Système : 4-PD/PD. Phase plasmique avec différentes organisations : microagrégats accolés, d'une part, et subarrondis libres, d'autre part, d'où les variations de porosité locale.



Horizon A_{Bp} (16-24 cm) PCG₁₂. Système : 4-PD/PD. Agrandissement de la photo précédente, avec macroporosité tubulaire (activité biologique).



Horizon B_w (31-60 cm) PCG₁₂. Système : 4-PD/PD. Squelette identique ; phase plasmique avec microagrégats plus petits, plus arrondis et moins tassés.



Outil pour la préparation du sol : pulvérisateur à disque lourd, châssis autoporteur.



Charrue à disques.

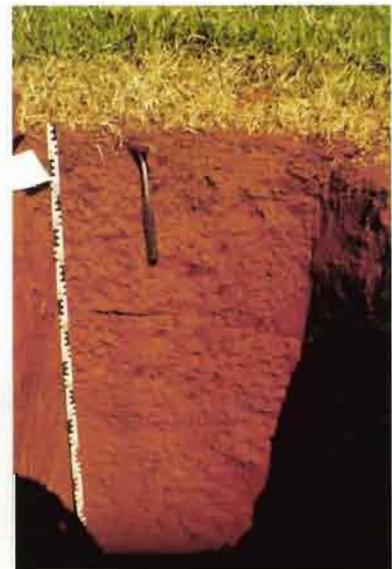


Charrue à socs.



Semeuse adaptée pour semis direct.

Aspects de relief et de végétation des cerrados.



LSG₀ - Goiânia. Profil de sol ferrallitique « rouge » typique (*Latosolo Vermelho-Escuro*) des cerrados.

En pays bamiléké, l'occupation et l'aménagement de l'espace rural opposent d'une part les plateaux (1 400 m - 1 600 m) densément occupés et intensément cultivés (1^{er} plan), d'autre part les montagnes (1 600 m - 2 700 m), souvent vides d'hommes, peu aménagées et soumises à une exploitation pastorale extensive (2^e plan).



Sur le plateau d'occupation ancienne, les haies vives renforcées de nervures de raphias bordent les chemins de circulation des hommes et du bétail (1^{er} plan). Elles enferment des cases et des champs multi-étagés dans lesquels s'associent caféiers, arbres fruitiers, bananiers et cultures annuelles (2^e plan).



Dans les zones d'agriculture intensive du plateau (2^e plan), l'introduction du maraîchage s'accompagne d'une ouverture des paysages, qui rend vulnérable à l'érosion ces sols peu couverts (1^{er} plan).



En l'absence d'un couvert végétal, l'érosion s'accélère. Elle emporte les fines particules du sol, laissant sur place des cailloux, ou creuse des rigoles qui s'approfondissent à chaque saison des pluies.



Photo E. Roisé

La colonisation culturelle des pâturages d'altitude des Bamboutos (2 200 m - 2 700 m) forme un néobocage qui rappelle le bocage traditionnel du plateau : longues clôtures qui protègent les champs du bétail qui pâture muni d'un carcan (1^{er} plan) ; haies vives monospécifiques d'eucalyptus, témoins d'une occupation plus ancienne (2^e plan).



Sur les plans sommitaux des Bamboutos (2 500 m - 2 700 m), le dense tapis herbacé peut efficacement protéger le sol contre l'érosion (1^{er} plan). Cependant, le surpâturage y entraîne une dénudation progressive des versants en dépit de la présence du néobocage défensif sur les parties gagnées par les cultures (2^e plan).

Effet des techniques culturales sur l'érosion et la dégradation des sols sableux du Nord-Cameroun soumis aux cultures sarclées intensives : 309-325

Photos : E. Roose



Parcelle de maïs soumise au labour. Noter que la surface du sol est complètement fermée par la battance des pluies très agressives de début de saison. Les grains de sable blanchis et nettoyés par les pluies couvrent la surface du sol très appauvri en matières organiques. Le ruissellement peut dépasser 80 % lors des gros orages.



Après labour, le maïs est soumis à un sarclage, puis à un buttage pour enfouir l'urée. S'il n'est pas exécuté strictement en courbe de niveau, le buttage augmente la pente du terrain, concentre les eaux de ruissellement et favorise le transport des sables.

Pour éviter que le sol labouré, peu cohérent, soit exposé aux pluies, on peut le couvrir avec des



pailles provenant des parcelles voisines (ici 6 t/ha de pailles fraîches). Ce paillage ralentit considérablement l'érosion, mais implique un gros supplément de travail en période chargée et n'a pas d'effet sur les rendements des cultures.



Une autre stratégie consiste à laisser pousser les adventices, à les griller aux herbicides lorsqu'elles atteignent 20 cm et à réduire le travail du sol à la ligne de semis. Ruissellement et érosion sont alors très modestes, mais le maïs semble souffrir d'un drainage excessif et d'un manque d'azote.



Une autre solution : cloisonner le paysage par des haies vives herbeuses ou arbustives (*Cassia siamea*) et labourer en courbes de niveau strictes. L'érosion est alors réduite au niveau du versant, mais la

dégradation du sol se poursuit entre les haies si on ne développe pas un système cultural plus équilibré (station IRA de Mbissiri).



Vue de la savane brûlée et pâturée traditionnellement et de la parcelle mise en défens. Noter l'envahissement par les grandes graminées pérennes et les arbustes là où l'on a maîtrisé le feu allumé par les éleveurs. Ruissellement et érosion sont négligeables dans le milieu naturel non brûlé, mais la pratique du feu reste indispensable pour le pâturage du bétail.

Contribution de l'agroforesterie à la maîtrise de l'érosion en montagne (Rwanda) : 327-349

Photos : E. Roose



La construction de terrasses radicales entraîne la suppression de tous les arbres sauf le long des chemins, lesquels posent de gros problèmes de stabilisation. Ces terrasses ne sont pas utilisées par manque de fumier et de fertilisant, indispensables aux cultures pour surmonter les carences des horizons profonds du sol terrassé.



Les hautes terres de la région de Ruhengeri sont enrichies par les cendres volcaniques, mais très sensibles à l'érosion du fait des pentes très fortes, de la pression démographique et des secousses sismiques. On remarque les eucalyptus plantés sur les sols menacés de glissement, les lignes de *Pennisetum* qui ralentissent peu l'érosion et les microterrasses en escalier qui permettent de produire des cultures vivrières sur des pentes de 80 %.



L'efficacité des haies vives de *Leucaena* et *Calliandra* a été démontrée sur des parcelles de 100 m². Cependant, la maîtrise de l'érosion ne permet pas d'améliorer la productivité de ces sols ferrallitiques très acides et carencés en phosphore. Il faut en plus corriger la toxicité aluminique et nourrir la culture.



À l'arborétum de Ruhande, près de Butare, on a réussi à développer la culture du maïs entre des haies de *Calliandra* et 300 tiges de *Cedrella odorata*. L'arbre apporte en partie la solution à l'intensification des cultures en Afrique tropicale, mais un complément chimique reste indispensable pour améliorer la productivité sur ces sols très pauvres.

Sur les hautes terres, les haies vives arbustives peuvent servir pour cloisonner les pâturages et produire le bois indispensable pour les usages domestiques.



Une sylviculture mal adaptée — plantation trop serrée d'eucalyptus — peut aboutir à la disparition du sous-bois (concurrence hydrique) et de la mésofaune (litière anti-septique) et au décapage de l'horizon humifère par l'érosion.



Contribution de la bananeraie à la gestion de l'eau et des nutriments sur les sols acides des hauts plateaux du Burundi : 367-383

Photos : E. Roose



Lorsqu'un nouveau ménage s'installe, il implante d'abord sa case, puis sa bananeraie alentour : celle-ci va bénéficier de tous ses soins et recevoir les déchets organiques et les cendres du foyer.



À l'échelle du versant, la bananeraie occupe plus de 20 % de la surface totale, en particulier si la densité de la population est élevée et l'implantation ancienne.



La bananeraie est généralement continue, en cercles de moins en moins denses à mesure qu'on s'éloigne du *rugo* (habitat) ; mais récemment, s'est développée l'idée d'une culture vivrière en bandes de terrains peu pentus alternant avec des talus protégés par une bande de *Pennisetum* et avec une ligne de bananiers plantés dans des fosses recueillant tous les déchets de production.



La touffe de bananiers profite bien de l'humidité du talus, tandis que la bande enherbée, très vigoureuse, ralentit le ruissellement et piège une grande partie des sédiments. La terrasse cultivée perd progressivement sa pente et le versant se stabilise. Les fosses compostières peuvent aussi servir de drain pour les eaux qui ruissellent sur les chemins d'exploitation.

Dans une bananeraie peu dense au sol nu (1^{er} stade de colonisation), l'érosion peut être importante. Pour éviter les pertes en eau et en terre, on paille le sol ou on le couvre de haricots, de cucurbitacées ou de colocases qui profitent de la fertilisation de la bananeraie.



Photo T. Rishirumukirwa

Traditionnellement on applique le paillage en couronne. Cette méthode arrête peu le ruissellement. Si on le dispose en bandes, les rigoles disparaissent et des terrasses progressives se forment entre les lignes de bananiers.

La GCES appliquée à l'aménagement des versants cultivés et aux ravines dans les montagnes méditerranéennes semi-arides algériennes : 289-308

Photos : E. Roose

Les abricotiers ne protègent pas la terre durant les pluies les plus agressives de l'hiver et du printemps. De plus, le double labour croisé pousse les terres arables vers l'aval de telle sorte qu'au bout de 30 ans il manque 30 cm de terre entre les arbres.



L'aménagement de ce verger (bande enherbée entre les arbres) et l'introduction d'une culture associée (blé/fève) ont réduit les pertes en terre et en eau et amélioré le couvert

végétal en saison pluvieuse ainsi que les revenus nets des paysans. Cette stratégie de protection de l'environnement montagnard par l'intensification de la production est beaucoup mieux acceptée que les terrassements conventionnels.



Sur le versant calcaro-marneux surpâturé de Souagui, le ruissellement lors des averses exceptionnelles a creusé une série de ravines parallèles. Les transports de sédiments (100 à 300 t/ha/an) lors des plus grosses averses correspondent à l'arrachement des altérites (10-15 mm) formées sur les versants en V.



Après fixation du fond de ravine par quatre types de seuils, les versants qui tendent vers la pente d'équilibre se sont revégétalisés naturellement. La ravine stabilisée fonctionne comme une « oasis linéaire », havre de verdure dans ce milieu particulièrement aride en été.



L'équipe « érosion » de l'Inref a comparé divers types de seuils aux gabions conventionnels. Ces derniers coûtent cher et doivent être soigneusement construits et fixés par la végétation pour éviter que se forment des « renards », tunnels sous le seuil qui remobilisent tous les sédiments et peuvent détruire le dispositif de proche en proche.

Ce seuil léger constitué de grillage de fer ou de plastique (maille de 1 cm), appuyé sur des fers cornières de 250 cm de long, enfoncés de 50 cm dans le sol et stabilisés par des tendeurs en fil de fer galvanisé, coûte quatre fois moins cher que les gabions. Il est plus souple à utiliser en montagne et tout aussi efficace pour piéger les sédiments.



Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne

Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion

Éric ROOSE (1), Mourad ARABI (2), Khaled BRAHAMIA (2),
Rachid CHEBBANI (2), Mohamed MAZOUR (2) et Boutkhal MORSLI (2)

(1) Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

(2) INRF, BP 37, Cheraga, Alger, Algérie.

RÉSUMÉ

Depuis le début du siècle, la région montagneuse septentrionale de l'Algérie est soumise à de fortes pressions en hommes et en bétail qui ont contribué à une sévère dégradation des sols, de la couverture végétale et des rivières. Pour protéger les terres et réduire l'envasement des barrages, l'administration des Forêts a imposé une stratégie d'équipement hydraulique rural appelée « Défense et restauration des sols » (DRS) qui tient à la fois de la RTM (Restauration des terrains de montagne : mise en défens et reforestation de 800 000 ha de terres épuisées dans les hautes vallées et correction des ravines en amont des barrages) et de la CES (Conservation de l'eau et des sols : terrassement de 350 000 ha de terres cultivées). Mais, dès 1980, l'échec de cette approche était patent. Malgré quarante ans de DRS, les terres continuent de se dégrader, les paysans n'entretiennent pas les dispositifs et les transports solides sont aussi préoccupants.

Deux instituts de recherche (l'INRF et l'Orstom) ont décidé, en 1985, d'unir les efforts d'une douzaine de chercheurs pour tester une nouvelle approche participative visant à la valorisation de la terre et du travail tout en réduisant les risques d'érosion en milieu rural : la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Il s'agit d'intensifier les systèmes de culture régionaux pour mieux protéger la surface du sol contre l'énergie des pluies et du ruissellement.

Cet article présente la synthèse des mesures de ruissellement, d'érosion en nappe et de production de biomasse sur un réseau de 50 parcelles (de 100 m²) réparties dans quatre régions méditerranéennes montagneuses (pentes de 10 à 45 %) s'étageant de 400 à 900 m d'altitude et recevant de 300 à 650 mm de pluie. De 1986 à 1995 furent comparés les comportements de jachères nues (risque maximal), de systèmes de production régionaux (blé, fève, vigne, fourrages, verger, parcours) et de systèmes améliorés (fertilisation, semences sélectionnées, pesticides et herbicides, rotation céréales-légumineuses, cultures associées au verger, enrichissement des parcours).

Durant cette décennie, les pluies au nord-ouest de l'Algérie ont été déficitaires et peu agressives, à part quelques orages de fréquence rare (100 à 400 mm en un à cinq jours) qui laissent des blessures profondes dans le paysage. Le ruissellement a été très modeste sous végétation naturelle ou cultivée ($K_{ram} = 1$ à 11 %), sauf lorsqu'une grosse averse est tombée sur des terres saturées, tassées, dénudées ou encroûtées, auquel cas il a pu atteindre 30 à 85 % et causer beaucoup de dégâts en aval. L'érosion a été modérée tant en milieu cultivé que naturel ($E = 0,1$ à 3 t/ha/an) ; elle a atteint 20 t/ha sur sol fersialitique rouge sur un versant nu de 35% de pente (35 fois moins qu'en Côte d'Ivoire !). La faiblesse de l'érosion s'explique partiellement par les pluies déficitaires, mais surtout par la remarquable résistance des sols à l'érosion en nappe ($K_{usle} = 0,002$ à 0,02) due à la richesse des sols en cailloux et en argile saturée en calcium. Curieusement, on n'a pas observé de relation étroite entre la pente, le ruissellement et l'érosion : cela remet en cause la pratique systématique des terrassements dont l'écartement est calculé d'après la pente uniquement (équations de Ramser, Saccardy, etc.). Un diagnostic approfondi sur chaque colline est nécessaire pour comprendre le fonctionnement du versant avant d'entreprendre son aménagement. Les rendements en culture améliorée, à Ouzera, passent de 7 quintaux à plus de 45 quintaux à l'hectare pour le blé d'hiver, de 28 à plus de 40 quintaux pour le raisin, auxquels il faut ajouter 3 tonnes de blé ou de fève en culture associée. De plus, la paille et les autres résidus

de culture voient leur rendement augmenter très nettement (de 2 à 22-30 quintaux à l'hectare) de telle sorte que la production animale (et la disponibilité en fumier) peut aussi se développer. Le revenu net à l'hectare est multiplié par trois à vingt selon le système de production choisi : la capacité de nourrir la population sur un terroir a donc augmenté. En définitive, l'amélioration des systèmes de culture (et la GCES) a permis d'accroître la productivité des terres et de réduire les risques érosifs, à condition qu'elles reçoivent suffisamment de pluie pour valoriser les intrants ($P > 400$ mm).

MOTS CLÉS : Algérie — Montagne méditerranéenne — Semi-aride — Stratégie GCES — Érodibilité des sols — Vertisol — Sol fersialitique — Sol brun calcaire — Amélioration des techniques culturales — Érosion — Ruissellement — Rendement — Revenu net.

ABSTRACT

SHEET EROSION AND RUNOFF IN ALGERIAN MEDITERRANEAN MOUNTAIN. REDUCTION OF EROSION HAZARDS AND INTENSIFICATION OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION BY GCES: SYNTHESIS OF THE 1984-1995 CAMPAIGNS ON A NETWORK OF 50 RUNOFF PLOTS

Since the beginning of the century, the northern mountainous area of Algeria has been subjected to big pressures by men and cattle which contributed to a severe degradation of soils, plant cover and rivers. In order to protect soils and to reduce dam silting, the Forest Authorities imposed a strategy concerning the rural hydraulic equipment called « RDS » « Soil defence and restoration » which depends both on RTM (Restoration of mountainous soils: global protection and reforestation of 800,000 ha of degraded soils in high valleys and gully management upstream of dams) and on CES (Water and soil conservation: embankment of 350,000 ha of cultivated soils). But as soon as 1980, the failure of this approach was obvious. Despite forty years of Soil defence and restoration, soil degradation goes on, peasants do not maintain the equipment and solid transports are also worrying.

In 1985, two research institutes (INRF and Orstom) decided to gather the researches conducted by a dozen researchers in order to test a new collaborative approach aiming at enhancing the soil and the labour, while reducing the erosion hazards in rural areas: the sustainable management of water, biomass and soil fertility (GCES). The question is to intensify the regional crop systems in order to better protect the soil surface against the rainfall and runoff energy.

This paper gives the synthesis of the measurements made concerning runoff, sheet erosion and biomass production in a network of 50 plots (100 m²) distributed over four mountainous mediterranean regions (slopes of 10 to 45 %) ranging from 400 to 900 m of altitude and from 300 to 650 mm of rainfalls. From 1986 to 1995, comparisons were made on the behaviours of bare fallows (maximum hazard), of regional production systems (wheat, broad beans, vineyard, fodder, orchard, rangelands) and of improved systems (fertilization, high-quality stock seed, pesticides and herbicides, cereals/legumes rotation, crops associated with orchard, improvement of rangelands).

During this ten year period, rainfalls were low and not very violent in the northwest of Algeria, apart from a few rare storms (100 to 400 mm within 1 to 5 days) which lead to big damage in the landscape. Runoff was very moderate under natural or cultivated vegetation ($K_{ram} = 1$ to 11 %), except when a big shower affects saturated, compact, bare or crusted soils, in which case it can reach 30 to 85 % and lead to many damage downstream. Erosion was moderate both in cultivated and natural areas ($E = 0.1$ at 3 t/ha/year); it reached 20 t/ha on red fersiallitic soil on a bare slope with a 35 % gradient (35 times less than in the Ivory Coast!). The low erosion is partly accounted by the low rainfalls, but above all by the remarkable soil resistance to sheet erosion ($K_{usle} = 0.002$ to 0.02) due to soils rich in pebbles and in calcium-saturated clay. No close relation was observed between slope, runoff and erosion: this questions the systematic embankments whose distance is calculated in relation to slope only (Ramser, Saccardy equations, etc.): a thorough diagnostic on each hill is necessary in order to understand the slope functioning before harnessing it. The yields obtained with improved crops at Ouzera increase from 7 to more than 45 hundredweight/ha for winter wheat, from 28 to more than 40 hundredweight/ha for grape to which 3 t of wheat or of broad beans must be added as a companion crop. Moreover, straw and the other crop residues increase considerably (from 2 to 22-30 hundredweight/ha/year) so that the animal production (and the available manure) can also develop. The net income per ha is increased by 3 to 20 according to the selected production system: therefore, the ability to feed the population on a soil increased. Finally, the improvement in crop systems (and GCES) allowed to increase soil productivity and to reduce erosion hazards, provided that the amount of rainfall should be sufficient to enhance inputs ($P > 400$ mm).

KEYWORDS : Algeria — Mediterranean mountain — Semi-arid — GCES strategy — Soil erodibility — Vertisol — Fersiallitic soil — Calcareous brown soil — Improvement in cultivation techniques — Erosion — Runoff — Yields — Net income.

RESUMEN

EROSIÓN LAMINAR Y ARROYADA EN LAS MONTAÑAS MEDITERRÁNEAS DE ARGELIA.
REDUCCIÓN DE LOS RIESGOS EROSIVOS Y INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA POR LA GCES : SÍNTESIS DE LAS CAMPAÑAS 1984-1995 EN UNA RED DE 50 PARCELAS DE EROSIÓN

Desde el principio del siglo, la región montañosa septentrional de Argelia está sometida a fuertes presiones humanas y ganaderas que han contribuido a una importante degradación de los suelos, de la cobertura vegetal y de los ríos. Para proteger las tierras y reducir el encenagamiento de las presas, la Administración de las selvas ha impuesto una estrategia de equipo hidráulico rural llamada « Defensa y restauración de los suelos » (DRS) que depende a la vez de la RTM (Restauración de los suelos montañosos : protección global y reforestación de 800 000 ha de suelos degradados en los valles altos y aprovechamiento de los canales más arriba de las presas) y de la CES (Conservación del agua y de los suelos : relleno de 350 000 ha de suelos cultivados). Pero desde 1980, el fracaso de esa aproximación era patente. A pesar de cuarenta años de DRS, las tierras siguen degradándose, los campesinos no mantienen los equipos y los transportes sólidos también están preocupantes.

En 1985, dos institutos de investigación (INRF y Orstom) decidieron asociar los esfuerzos de unos doce investigadores para testar una nueva aproximación colectiva que intenta valorizar la tierra y el trabajo mientras reduce los riesgos de erosión en las regiones rurales : la gestión durable del agua, de la biomasa y de la fertilidad de los suelos (GCES). Se trata de intensificar los sistemas de cultivos regionales para proteger mejor la superficie del suelo contra la energía de las lluvias y de la arroyada.

Ese artículo hace la síntesis de las medidas de arroyada, de erosión laminar y de producción de biomasa en una red de 50 parcelas (100 m²) distribuidas en cuatro regiones mediterráneas montañosas (pendientes de 10 a 45 %) cuya altitud se comprende entre 400 y 900 m y cuyas precipitaciones van de 300 a 650 mm. Desde 1986 hasta 1995, se compararon los comportamientos de los barbechos completos (riesgo máximo), de sistemas de producción regionales (trigo, habas mayores, viña, forrajes, huerto frutal, pastos comunales) y de sistemas mejorados (fertilización, semillas de primera categoría, pesticidas e herbicidas, rotación cereales/leguminosas, cultivos asociados con el huerto frutal, mejoramiento de los pastos comunales).

Durante ese decenio, las lluvias en el noroeste de Argelia fueron deficitarias y poco agresivas, excepto algunos aguaceros raros (100 a 400 mm dentro de 1 a 5 días) que causan grandes daños en el paisaje. La arroyada fue muy modesta bajo vegetación natural o cultivada ($K_{ram} = 1$ a 11 %), excepto cuando un aguacero fuerte cayó sobre tierras saturadas, compactas, desnudadas o incrustadas, en cuyo caso puede alcanzar 30 a 85 % y causar muchos daños más abajo. La erosión fue moderada tanto en las zonas cultivadas como en las zonas naturales ($E = 0,1$ a 3 t/ha/año); alcanza 20 t/ha en suelo fersialítico rojo sobre una vertiente desnuda con una pendiente de 35 % (35 veces menos que en la Costa de Marfil !). La erosión baja se explica parcialmente por las lluvias deficitarias, pero sobre todo por la resistencia extraordinaria de los suelos a la erosión laminar ($K_{usle} = 0,002$ a 0,02) debida a los suelos ricos en piedras y en arcilla saturada en calcio. No se ha observado ninguna relación estrecha entre la pendiente, la arroyada y la erosión : eso cuestiona la práctica sistemática de los rellenos cuya distancia se calcula según la pendiente únicamente (ecuaciones de Ramser, Saccardy, etc.) : un diagnóstico detenido en cada colina es necesario para comprender el funcionamiento de la vertiente antes de aprovecharla. Los rendimientos de cultivo mejorado en Ouzera aumentan de 7 a más de 45 quintales/ha para el trigo de invierno, de 28 a más de 40 q/ha para la uva a los cuales se debe añadir 3 t de trigo o de habas mayores como cultivo asociado. Además, la paja y los otros residuos de cosecha aumentan considerablemente (de 2 a 22-30 quintales/ha/año) de modo que la producción animal (y las disponibilidades de estiércol) también pueden desarrollarse. La renta neta per ha se multiplica por 3 a 20 según el sistema de producción elegido : la capacidad para alimentar a la población en una tierra ha aumentado por consiguiente. Finalmente, el mejoramiento de los sistemas de cultivos (y la GCES) ha permitido aumentar la productividad de las tierras y reducir los riesgos erosivos, siempre que la cantidad de lluvias sea suficiente para valorizar las aportaciones ($P > 400$ mm).

PALABRAS CLAVES : Argelia — Montaña mediterránea — Semiarido — Estrategia GCES — Erodibilidad de los suelos — Vertisuelo — Suelo fersialítico — Suelo pardo calcareo — Mejoramiento de las técnicas de cultivo — Erosión — Arroyada — Rendimientos — Renta neta.

INTRODUCTION

Le bassin méditerranéen, berceau de civilisations brillantes, a attiré au cours des siècles des populations nombreuses. Les activités qui ont accompagné ces colonisations successives (défrichement, agriculture, élevage, urbanisation, guerre) ont entraîné la dégradation des couvertures végétales, des sols, des rivières, du climat et finalement des sociétés. Un survol rapide du nord de l'Algérie, la région la plus productive, mais aussi la plus fragile, nous montrerait des montagnes surpâturées et des garrigues brûlées, des collines dénudées, des sols squelettiques cultivés, décapés par l'érosion en rigole et par le labour, des versants et des plaines lacérés par les ravines

et les oueds, rivières torrentielles qui dévorent les basses terrasses et envasent les barrages en une trentaine d'années.

Quel est le responsable de ces paysages désolés et pourtant si attachants ? L'homme et ses activités dévastatrices, rarement raisonnable quand il s'agit de prendre possession des ressources naturelles (LAQUINA, 1994) ? Ou bien le milieu méditerranéen, réputé particulièrement fragile du fait de ses reliefs jeunes (alternance de roches tendres argileuses et de roches dures), de ses climats agressifs (pluies abondantes tombant en hiver sur des sols déjà saturés et orages violents à la fin de l'été torride) et du mode d'exploitation extensif des terres ?

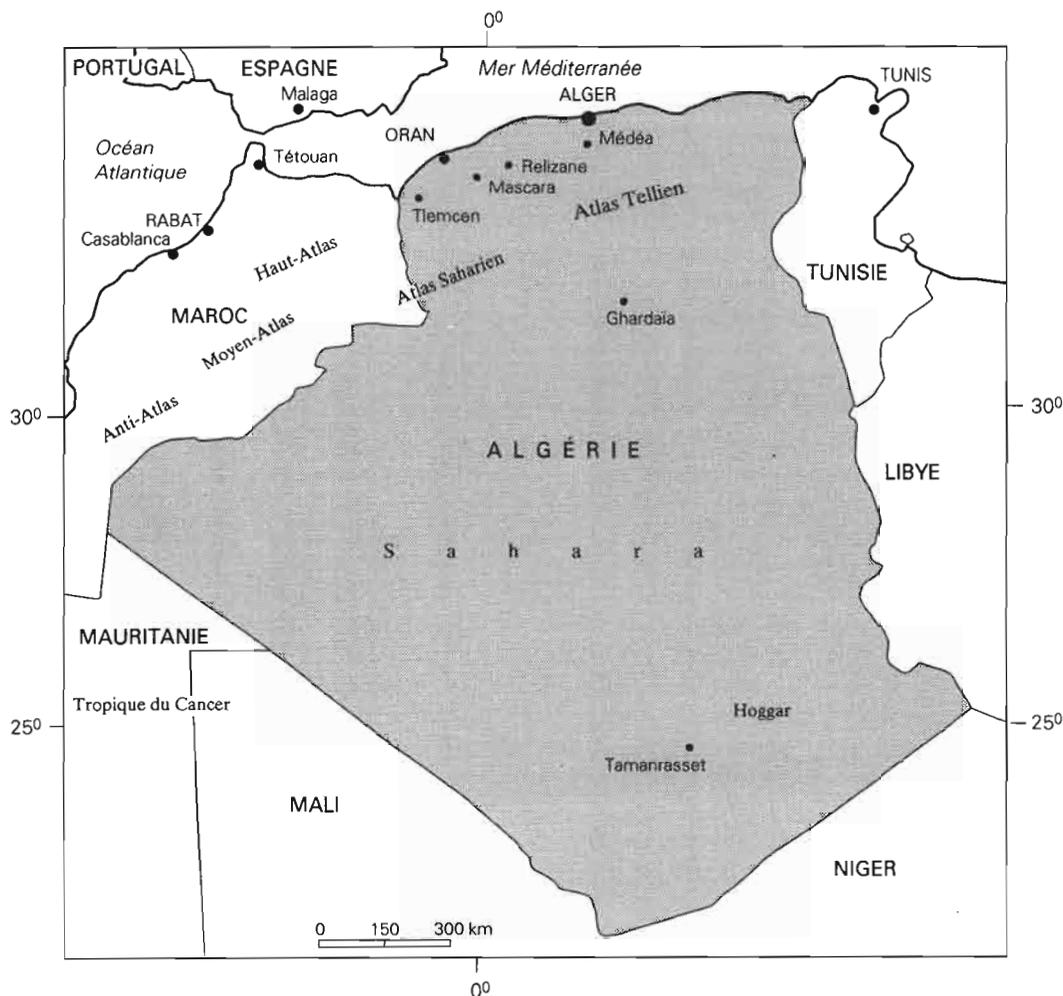


FIG. 1. — Situation des stations de mesure en Algérie.
Position of the runoff stations in Algeria.

Pour faire face à ces graves problèmes d'érosion, une stratégie faisant appel à des équipements hydrauliques lourds fut développée par l'administration des Eaux et Forêts pendant la période 1940-1980 (PUTOD, 1956 ; PLANIÉ, 1961 ; MONJAUZE, 1962 ; GRÉCO, 1979). La DRS (Dé-

fense et restauration des sols) tient à la fois de la RTM (Restauration des terrains de montagne) et de la CES (Conservation de l'eau et des sols) et comprend :

— la reforestation des hautes vallées (800 000 ha depuis 1962 ; MAZOUR, 1992) ;

— la correction torrentielle dans les périmètres de protection des barrages ;

— le terrassement des champs cultivés (350 000 ha de banquettes à un coût de 5 000 à 10 000 FF l'hectare ; HEUSCH, 1986).

Le principal objectif était de retarder l'envasement des barrages et de protéger les équipements et les terres. Mais, en 1980, l'échec de cette approche technocratique d'équipement hydraulique des zones rurales pour le bien public était évident. Malgré quarante années de lutte antiérosive, les terres ne cessent de se dégrader, les paysans rejettent le système des terrasses de diversion, la production de bois est restée faible et le taux d'envasement des barrages demeure très élevé. Le programme d'aménagement des banquettes fut abandonné pour des raisons économiques (HEUSCH, 1986). Les forestiers poursuivent la reforestation et la correction torrentielle des ravines, mais les fermiers ne reçoivent plus d'aide pour maîtriser l'érosion sur leurs terres, à part le sous-solage des sols à croûte calcaire (ROOSE, 1987). En revanche, l'Algérie a réalisé un effort considérable pour la construction de barrages (une quinzaine en dix ans ont été mis en service ; MAZOUR, 1992), mais ils semblent dangereusement menacés par l'envasement. Leur durée de vie ne dépasserait guère trente à cinquante ans, car le taux d'érosion spécifique des bassins versants d'Algérie serait parmi les plus élevés du monde (2 000 à 4 000 t/km² par an) (DEMMAK, 1982).

Les premières mesures d'érosion sur parcelles expérimentales (de 100 m²) (KOUIDRI *et al.*, 1989) confirmèrent l'hypothèse défendue par HEUSCH (1970) au Maroc et DEMMAK (1982) en Algérie, selon laquelle l'érosion en nappe sur les versants cultivés n'apporte qu'une très petite part (0,2 à 10 t/ha/an) aux sédiments transportés par les rivières. Cela expliquerait pourquoi les terrassements furent peu efficaces pour réduire l'envasement. Cependant, le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80 % durant les averses exceptionnelles tombant sur des terres engorgées, encroûtées ou compactées (surpâturage, pistes et routes, jachères abandonnées, toits et cours d'habitation, etc.). La nouvelle hypothèse pour expliquer l'érosion dangereuse des bassins versants est donc le ruissellement exceptionnel qui dévale des pentes engorgées, mal couvertes par la végétation : il creuse les ravines, augmente les débits de pointe des oueds et provoque des glissements de terrain, l'érosion des berges et l'envasement rapide des barrages.

Actuellement, avec la crise économique, les villes industrielles connaissent des problèmes d'emploi. Le gouvernement algérien souhaite maintenir la population à la campagne et intensifier l'agriculture en montagne, sans augmenter pour autant la dégradation des terres, ni la pollution des eaux, si essentielles pour le développement de l'irrigation et l'expansion des villes.

Depuis 1985, l'Institut national algérien pour la recherche forestière (INRF) et l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (Orstom) ont uni les efforts d'une douzaine de chercheurs pour développer un programme de formation et de recherche sur les causes et les facteurs de différents processus d'érosion et pour tester dans les montagnes méditerranéennes semi-arides d'Algérie une nouvelle approche participative de la lutte antiérosive : la gestion conservatoire de l'eau de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) (ROOSE, 1987). Ce programme comprend trois volets :

— une enquête sur l'efficacité de l'approche DRS, d'abord par l'INRF et l'administration des Forêts pour situer et décrire les aménagements existants, puis par un groupe interdisciplinaire de chercheurs, pour évaluer leur fonctionnement ;

— l'aménagement de micro-bassins versants (de 20 à 300 ha) près de Médéa, Mascara et Tlemcen ;

— la quantification des différents processus d'érosion dans un réseau de ravines et de parcelles d'érosion. C'est de ce dernier volet dont il sera question dans cet article.

L'analyse de la CES et de la DRS a montré que les terrassements n'ont guère intéressé les paysans car ces travaux exigent beaucoup de travail à l'entretien, réduisent la surface cultivable de 5 à 15%, mais n'améliorent pas la productivité des terres, ni les revenus des paysans. Cette approche des problèmes d'érosion procède d'une logique « aval » technocratique qui vise avant tout la protection des équipements et de la qualité des eaux. La majorité des aménagements ne sont donc pas entretenus par les paysans, ou sont même détruits progressivement par le labour.

Si on veut que les paysans participent à la protection du milieu rural et de la qualité des eaux, il faut d'abord répondre à leurs préoccupations immédiates. C'est pourquoi la GCES aborde les problèmes d'érosion par une logique « amont ». Comment améliorer la productivité des terres et du travail, en gérant au mieux l'eau disponible, la biomasse et la fertilité des sols ? Par l'intensification de l'utilisation des intrants sur les meilleures terres, on augmente la couverture végétale et on réduit les risques d'érosion. Nos recherches visent donc, dans un premier temps, à améliorer le système de production sur des parcelles d'érosion et à vérifier qu'il est rentable d'intensifier la production de biomasse et possible de réduire les risques d'érosion et de ruissellement sur les fortes pentes, où l'on craint le plus la dégradation du milieu (ROOSE, 1987).

Nous présentons ici une synthèse des résultats obtenus sur le réseau des parcelles d'érosion de l'INRF à Ouzera (KOUIDRI *et al.*, 1989 ; ARABI, 1991 ; ARABI et ROOSE, 1992), à Aïn Fares/Mascara (MORSLI, 1995), à Tlemcen (MAZOUR, 1992 ; CHEBBANI *et al.*, 1995) et au projet Oued Mina (BRAHAMIA, 1993), soit 50 parcelles d'une centaine de mètres carrés représentant les principaux sols cultivés,

leurs systèmes de production, dans une zone recevant 300 à 650 mm de pluie.

On y a testé également différentes innovations en vue d'une exploitation intensive et durable des ressources naturelles des montagnes de l'Atlas depuis le centre (Médéa) jusqu'à l'ouest (Tlemcen) de l'Algérie du Nord.

Les trois premières stations relèvent de la convention INRF-Orstom, et celle de Taasalet d'une convention INRF-Projet de développement de l'oued Mina (GTZ). Nous remercions ces institutions d'avoir permis à « l'équipe érosion » de réaliser ces études, interrompues malheureusement avant terme.

LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le réseau comprend 50 parcelles de mesure de l'érosion d'une centaine de mètres carrés (longueur : 22,2 m ; largeur : de 4,5 à 10 m) isolées par des tôles fichées en terre. Au bas des parcelles, un canal dirige les eaux de ruissellement et leur charge solide vers deux à trois cuves de stockage reliées par des partiteurs tarés sur le terrain (ROOSE, 1981 ; ARABI, 1991).

Les paramètres mesurés sont la pluie (hauteur, intensité, érosivité), le ruissellement (Kram, le coefficient de ruissellement annuel moyen en % des pluies, et K_{max}, le coefficient de ruissellement maximal pour une averse importante), l'érosion en nappe et en rigole (érosion totale en t/ha/an, comprenant les suspensions fines et les sédiments grossiers), la production de biomasse (rendement en q/ha/an), les revenus nets (en US \$/ha/an) et les paramètres d'état de surface (% de surface couverte, % de surface fermée par la battance, % de cailloux et d'humidité des dix premiers centimètres).

Dans chaque station définie par un type de sol, une pente (longueur constante et pourcentage fort, mais typique pour le sol considéré), un système de production en place depuis plus de dix ans et une pluviosité moyenne, on compare le comportement d'un témoin absolu (sol nu travaillé dans le sens de la pente) à un témoin régional (système de production traditionnel) et à un ou deux systèmes améliorés. Le climat de la zone est méditerranéen à hiver frais. Les améliorations portent sur le travail du sol (conservatoire de l'eau), les herbicides, pesticides et graines sélectionnées, une fertilisation minérale adaptée aux sols et cultures, une jachère de légumineuses, des tentatives d'enrichissement des parcours, des rotations plus intensives et des cultures intercalaires sous les vergers.

À Médéa, quinze parcelles ont été installées à proximité de la station INRF de Ouzera, à 7 km de Médéa et à 90 km au sud d'Alger. Le paysage est constitué d'une série de plateaux (de 900 à 1 200 m d'altitude), de versants raides (pentes de 12 à 40 %) et de vallées profondes où coulent temporairement des oueds instables.

Les sols sont liés à la lithologie (marnes et grès calcaires) et à la situation topographique (POUGET, 1974 ; AUBERT, 1987).

Les principaux sols de la région sont :

- les sols jaune clair, lithosols sur colluvions calcaires, pauvres en matière organique ;
- les vertisols gris sur marnes, très argileux, bien structurés, avec 2 % de matière organique, saturés en calcium (pH 7 à 8) et résistants à la battance des pluies ;
- les sols rouges fersialitiques lessivés sur grès tendres, pauvres en matière organique, instables ;
- les sols bruns calcaires sur colluvions, avec 2 à 3 % de matière organique, bien structurés, mais à horizon humifère très superficiel, généralement caillouteux ; si l'horizon humifère repose directement sur l'altérite calcaire, on parle de rendzine.

Le système de production a beaucoup évolué ces dernières années. Dans cette zone montagneuse, entre 1982 et 1991, le couvert forestier a diminué de 18 à 13 %, tandis que les surfaces en vignoble et verger ont augmenté respectivement de 5 % et de 6 %. Le blé et la fève restent discrets et leur rendement médiocre (8 q/ha). Les pratiques culturales sont limitées : un labour profond (20 à 25 cm) pour contrôler les adventices à l'automne et (ou) au printemps, suivi d'un binage pour enfouir les engrais (N 33, P 45, K 90) et briser les grosses mottes. Après la récolte, les troupeaux migrant des zones steppiques viennent pâturer les résidus de culture. Le peu de fumier disponible est rentabilisé par les cultures de légumes dans les terres irrigables. Les précipitations moyennes sur quarante ans s'élèvent à 680 mm à la station météorologique de Médéa.

Le dispositif permet de comparer pendant quatre années les risques de ruissellement et d'érosion sur une jachère nue cultivée à ceux dans quatre systèmes de production (ici un verger d'abricotiers de trente ans, une vieille vigne sur terrassettes en courbe de niveau, un système agropastoral blé-pâture et un matorral surpâturé), sur quatre sols représentatifs de la région. (On notera qu'un matorral est une formation arbustive à épineux soumise régulièrement aux feux, qu'on appelle « garrigue » sur calcaire ou « maquis » sur terrains acides.)

À Taasalet (60 km au nord de Relizane), huit parcelles ont été installées en 1989 sur des versants convexes portant un sol brun calcaire vertique sur marnes (pentes de 9 et 21 %) et une rendzine sur roche marno-calcaire de 30% de pente. La comparaison porte sur la jachère nue, la culture d'orge à plat et de pois sur billons perpendiculaires à la pente. Les précipitations atteignent 350 mm en moyenne sur les postes les plus proches, mais elles furent très déficitaires (plus de 250 mm) pendant les trois cycles d'observation. Le paysage très aride est constitué de collines convexes surpâturées dont les sommets sont labourés et cultivés en céréales. L'introduction d'arbustes a échoué durant ces années très déficitaires : seul le labour profond

(20 cm) et le billonnage perpendiculaire à la pente ont réduit l'érosion (plutôt faible) et amélioré la production de biomasse fourragère.

À Mascara, dix parcelles d'érosion ont été installées en 1992 sur le terroir de Aïn Fares, à 30 km au nord de Mascara, sur un sol brun calcaire limoneux de 20 % de pente et sur un sol brun vertique très argileux de 45 % de pente.

La comparaison a porté sur la jachère nue, la jachère non travaillée, les céréales traditionnelles ou intensives avec engrais (N 20, P 45), les légumineuses fourragères et les pois sur billons isohypses. Dans cette région, les pluies moyennes dépassent 450 mm, mais furent très déficitaires en 1993-1994 et un peu moins en 1994-1995 (P = 241 et 320 mm).

À Tlemcen, dix-sept parcelles furent installées fin 1989 près de Sidi Abdelli, dans les principales stations écologiques du bassin de l'oued Isser (1 140 km² en amont du barrage Izdihar), environ 50 km à l'est de Tlemcen. Au nord, le paysage est constitué de collines marneuses ar rondies (stations de Heriz et Cherif sur sols vertiques) où furent comparés des jachères (nues, traditionnelles ou à vesce/avoine), des blés traditionnels ou intensifs.

Au sud, le relief montagneux comprend des calcaires jurassiques (Madjoudj sur sol brun calcaire) et des intercalations gréseuses (Gourari sur sol rouge fersialitique) sur lesquels furent testés des jachères nues et des matorrals dégradés, enrichis ou en défens. La pluviosité annuelle moyenne varie autour de 530 mm et la pluviosité journalière de fréquence décennale peut atteindre 100 mm, généralement en avril-mai.

RÉSULTATS

Durant deux à six ans, les risques d'érosion ont été mesurés dans le milieu naturel et dans le milieu cultivé traditionnel ou amélioré, dans 50 parcelles d'érosion sur des versants raides (10 à 45 %) de petite montagne (altitude de 400 à 900 m), en climat méditerranéen (pluies de 350 à 650 mm). Bien que les observations n'aient pu durer aussi longtemps que souhaitable en raison des événements, les répétitions pluriannuelles dans quatre zones de la même région écologique donnent des résultats cohérents.

Tous les résultats annuels disponibles ont été rassemblés dans les tableaux V à XI, placés en annexe.

Les précipitations

Toute la région a connu des années pluviales déficitaires de 60 à 280 mm par rapport aux moyennes météorologiques sur trente ans.

À Médéa, 1988 et 1990 furent très secs (408 et 440 mm ; moyenne sur vingt ans, 650 mm) ; l'année 1991 fut presque normale avec une grosse averse en juillet. Les

résultats sont représentatifs d'une région à 530 mm (= médiane).

À Taasalet, les pluies ont été très déficitaires (188 à 44 mm ; moyenne sur vingt ans, 350 mm), à tel point que les céréales ont été échaudées : les résultats sont représentatifs d'une zone aride à 200 mm.

À Mascara, les campagnes 1994 et 1995 ont tant manqué de pluie (241 et 320 mm ; moyenne sur vingt ans, 450 mm) que les semis de pois et de *Sulla* fourrager n'ont guère couvert le sol. Les apports d'engrais et de semences sélectionnées n'ont pu être valorisés.

À Tlemcen, les campagnes 1990, 1991 et 1993 furent aussi très déficitaires (354, 321, 242 mm ; moyenne sur vingt ans, 500 mm). Les observations sont représentatives d'une région à 350 mm.

Non seulement la hauteur des pluies fut modeste dans toutes les stations, mais aussi leur intensité et leur agressivité. L'indice R_{USA} d'agressivité des pluies n'a guère dépassé 50 par campagne et le rapport $R_{USA}/$ hauteur annuelle n'atteint que 0,10 à 0,15 alors que ce rapport varie de 0,4 à 0,6 en Afrique de l'Ouest et de 0,2 à 0,3 dans les montagnes d'Afrique centrale (ROOSE et ARABI, 1994).

Il y a donc une situation paradoxale. D'une part, les climats méditerranéens sont réputés agressifs : les paysages sont très dégradés, les versants ravinés et les inondations catastrophiques nombreuses. Mais, d'autre part, les auteurs s'accordent pour constater de modestes indices d'agressivité des pluies en comparaison avec les pluies des régions tropicales humides (KALMANN, 1976 ; PIHAN, 1978 ; ROOSE, 1972, 1994 ; ARABI, 1991 ; MAZOUR, 1992). Cela semble indiquer que les séries de pluies saturantes et la faible épaisseur de la couverture pédologique sont à l'origine de ces phénomènes catastrophiques plus que l'agressivité des pluies orageuses, limitées dans l'espace.

Le ruissellement

Le ruissellement annuel fut très discret sous matorral et jachères pâturées ($K_{ram} = 0,6$ à 4 %), modeste sous cultures dans toutes les stations ($K_{ram} = 0,1$ à 7 %), mais il peut dépasser 5 à 28 % sur sol nu, même labouré.

Le ruissellement maximal lors d'une grosse averse varie beaucoup selon qu'il s'agit d'un matorral bien couvert ($K_{rmax} = 1$ à 9 %), d'un parcours fort dégradé, tassé, surpâturé ($K_{rmax} = 25$ à 30 %), d'une terre labourée et cultivée ($K_{rmax} = 1$ à 23 %) ou d'une terre nue, tassée, encroûtée par la pluie, engorgée ou peu profonde (K_{rmax} peut dépasser 50 à 85 %). C'est lors de ces événements exceptionnels (une fois tous les cinq à dix ans) que se déclenchent les graves manifestations de ravinement, de crue des oueds, de glissement de terrain et d'envasement rapide.

Le premier facteur qui explique la modestie du ruissellement en ces régions méditerranéennes, ce sont les pluies déficitaires et peu agressives observées durant les

années 1986 à 1995. Lorsqu'il manque 150 à 200 mm de pluie par rapport à la normale, ce sont les grosses averses et les séries d'averses rapprochées qui manquent, et par conséquent les occurrences d'engorgement du sol diminuent.

Le second facteur qui réduit le ruissellement est le couvert végétal et les techniques culturales. Sous végétation naturelle (matorral pâturé), le sol est couvert de 20 à 80 % de litière et végétation basse : le ruissellement, bien qu'assez fréquent à cause des chemins tracés par le bétail, ne fut jamais dangereux. Cependant, des terres de parcours dégradées (Ouzera), des vignes non entretenues (Ouzera), des jachères tassées (Mascara), des matorrals surpâturés (Gourari) peuvent manifester des ruissellements de 30 % lors des averses importantes. D'ailleurs, dans la montagne où les forêts sont surpâturées, il n'est pas rare d'observer des ravines provenant des chemins empruntés par le bétail et des parcours dégradés, ou même des plantations forestières surpâturées.

C'est évidemment sur sol nu et engorgé (en hiver) que le ruissellement est le plus fort, même si le sol a été labouré à l'automne et sarclé tous les mois. Les cas les plus graves ont été observés cinq fois à Ouzera sur vertisol nu, très humide, couvert d'une croûte de battance durant des pluies de plus de 80 mm tombant en un ou deux jours.

Les données du tableau I montrent qu'il est difficile de conclure sur l'aptitude des types de sols à ruisseler, car les pluies ont été très différentes d'une année à l'autre, et les observations de durée variable. De plus, les caractéristiques de la surface des sols et leur histoire sont plus importantes que le type pédogénétique. Les sols vertiques sont très peu perméables une fois le profil humecté et les argiles gonflées. Les sols fersialitiques rouges sont généralement perméables, mais, une fois dégradés, les horizons sableux pauvres en matière organique se tassent et le ruissellement devient aussi fort que sur les sols argileux. Les sols les plus perméables semblent les sols bruns calcaires souvent caillouteux.

TABLEAU I
Classement de l'aptitude à ruisseler des sols nus labourés
(K_{rmax} % observés et pluie d'imbibition si sol sec ou humide)
*Runoff capacity of bare tilled soils : maximum runoff coefficient (%)
and imbibition rainfall on dry or humid soil*

Station	Pluie (mm)	Vertisol gris	Fersialitique rouge	Calcaire brun	Rendzine brune (12 cm)
Médéa	650	80	40	33	-
Tlemcen	500	27-39	30	29	-
Mascara	450	30	-	28	-
Oued Mina	300	15	-	-	13
Pluie d'imbibition (mm)		3 à 20	4 à 10	6 à 22	6 à 14

La pluie d'imbibition nécessaire pour déclencher le ruissellement est de l'ordre de 10 à 22 mm sur sol sec et de 3 à 6 mm sur sol humide. Ces seuils de hauteur limite dépendent surtout de l'humidité préalable et de l'état de la surface du sol (déficit de saturation des dix premiers centimètres du sol, tassement par le bétail, fissures de dessiccation, trous de vers de terre, croûtes de battance ou de sédimentation, litière et canopée dressée, cailloux et mottes résiduelles créées par le travail du sol).

Comme d'autres auteurs, nous avons observé que le labour profond et grossier augmente temporairement l'infiltration. Par exemple, lorsqu'on a remplacé le labour par un sarclage par herbicide sous le vignoble de Ouzera, l'horizon superficiel s'est tassé et le ruissellement a été multiplié par trois, alors que les pertes en terre ont diminué. Du fait de cette amélioration temporaire, le labour a réduit le ruissellement et l'érosion durant ces années déficitaires. Mais, lors des années humides (et des averses ou séries

d'averses exceptionnelles), leur capacité de stockage et d'infiltration en eau peut être dépassée par l'abondance des pluies : surtout sur forte pente, les risques d'érosion sont plus élevés sur les sols travaillés, car le labour a réduit leur cohésion.

L'érosion en nappe et en rigole

Les pertes en terre mesurées sous végétation naturelle sont très réduites ($E = 30$ à 400 kg/ha) du fait des litières et végétations basses, et du même ordre que les observations en parcelle d'érosion sous les garrigues méditerranéennes (CLAUZON et VAUDOUR, 1969 ; MARTIN, 1975 ; DELHOUME, 1981). Cependant, sur le sol fersialitique tassé, l'érosion en nappe a atteint 2 t/ha/an la première année sous matorral dégradé, valeur peut-être surestimée à cause des perturbations de la surface lors de l'installation des tôles de bordure. Dans ces paysages surpâturés, on observe très souvent des chemins d'eau évoluant en ravines dangereuses.

L'érosion en nappe a été très modérée sur les diverses cultures testées ($E = 0,04$ à 3 t/ha/an) et même sur les jachères nues travaillées ($E = 0,7$ à 20 t/ha/an) malgré des pentes fortes (10 à 45 %). En effet, l'agressivité des pluies a été faible ($R_{USA} < 50$) et les sols sont très résistants ($K = 0,002$ à $0,025$), riches en argile saturée de calcium et souvent caillouteux. à titre de comparaison, sur les sols ferrallitiques sableux très résistants de basse Côte d'Ivoire (pluie : 2 000 mm), ROOSE (1973, 1980) a mesuré sur jachère nue des pertes en terre de 500 à 700 t/ha/an sur les mêmes dispositifs. Pour des pluies quatre fois plus abondantes et vingt fois plus agressives, les pertes en terre sont trente-cinq fois plus importantes à Abidjan avec 22 % de pente qu'à Ouzera sur un versant de 35 % de pente.

L'érosion en nappe, bien que sélective vis-à-vis des particules légères (matière organique, argile et limon) et des nutriments, ne semble pas le processus le plus actif sur les versants méditerranéens : même en comptant les plus fortes pertes observées sur sol rouge et 35 % de pente à Ouzera, soit 20 t/ha/an (= 1,3 mm de sol), il faudrait vingt-cinq siècles pour décaper l'horizon humifère sur 20 cm.

L'érosion en rigole et l'érosion mécanique sèche (par les instruments aratoires), qui ne sont pas sélectives, semblent bien plus actives dans l'évolution de la couverture pédologique des versants montagnards méditerranéens : le décapage de l'horizon humifère est plus fréquent que son appauvrissement en particules fines (A + L) et peut se faire en une génération. Par exemple, il manque 30 cm de sol entre les arbres d'un verger planté il y a trente ans près de la station d'Ouzera (soit 15 cm sur toute la surface de la parcelle). Même si on cumule pendant trente ans l'érosion mesurée à la parcelle nue près de ce verger (15 t/ha/an = 1 mm), l'érosion en nappe ne dépasserait pas 3 cm, tandis que la reptation de l'horizon cultivé atteindrait 12 cm (labour croisé au tracteur deux fois l'an). Ce processus de reptation par le travail du sol (*tillage erosion*

des Américains) est encore très mal connu (WASSMER, 1981, au Rwanda ; REVEL *et al.*, 1989-1990, en France) et fut souvent confondu avec l'érosion en nappe : sa vitesse de décapage augmente avec la fréquence des passages et la puissance des outils aratoires ainsi qu'avec la pente (ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1994). Le travail du sol participe activement à la formation des talus en bordure des champs.

DISCUSSION

L'érodibilité des sols

L'érodibilité (Kusle) des quatre types de sols testés sous pluies naturelles déficitaires pendant deux à six ans (tabl. II) a été calculée d'après l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1978) :

$$K_{USA} = E/R_{USA} \times SL \times 2,24$$

L'indice d'érodibilité des sols varie de $K = 0,002$ à $0,033$. L'érodibilité serait donc très faible d'après l'échelle mondiale où K augmente de 0,01 à 0,70 avec la fragilité des sols. Cependant, l'érosion augmente avec les années et avec l'agressivité des pluies : on peut donc s'attendre à une majoration de l'érodibilité des sols de Tlemcen, Mascara et Taasalet.

L'érosion sur jachère nue a été la plus forte sur sol fersialitique (5 à 20 t/ha/an), moyenne sur les sols vertiques gris ($E = 0,5$ à 6 t/ha/an) et faible sur les sols bruns calcaires ($E = 0,5$ à $3,6$ t/ha/an) et les rendzines ($E < 2$ t/ha/an). Le classement des sols en fonction des risques (par ordre décroissant) est donc un peu différent :

- risques de ruissellement : vertisols, sols fersialitiques, sols bruns calcaires, rendzine ;
- risques d'érosion en nappe : sols fersialitiques, vertisols, sols bruns calcaires, rendzine.

En réalité, si les vertisols sont résistants à la battance, une fois réhydratés le ruissellement est si fort qu'il provoque du ravinement.

TABLEAU II
Érodibilité (Kusle x 1 000) de quatre types de sols nus travaillés soumis aux pluies naturelles
Erodibility of four types of bare tilled soils subjected to natural rainfalls (expressed in Kusle x 1 000)

Station	Fersialitique rouge	Vertisol gris-brun	Brun calcaire brun + cailloux	Rendzine gris foncé
Ouzera	11 à 20	13 à 33	2 à 4	-
Tlemcen	25	25 à 10	10	5
Mascara	-	2	13	-
Oued Mina	-	5 à 10	-	2

L'effet de pente

Il est difficile de comparer sur les versants les risques de ruissellement et d'érosion en fonction de la pente, car les sols varient en même temps que les pentes, sauf dans la zone de Tlemcen où la pente augmente de 15 à 30 % sur un sol vertique gris sur marne.

Le tableau III montre clairement que, sur les jachères nues, les ruissellements moyen et maximal ont tendance à diminuer lorsque la pente augmente et que l'érosion est davantage liée au type de sol qu'à la pente. Ce résultat étonnant a déjà été observé au Maroc sur vertisol (HEUSCH, 1970) et en Côte d'Ivoire sur sol ferrallitique (ROOSE,

1973). HEUSCH (1970) a aussi montré que, sur vertisols, la position du champ dans la toposéquence a parfois plus d'importance pour l'érosion que la pente elle-même.

Or la plupart des études du risque d'érosion sont actuellement basées sur l'occupation des sols, l'érodibilité des sols ou des roches et la pente (pourcentage et longueur) (LE LANDAIS et FABRE, 1996). Nos résultats remettent en question certaines conclusions de ces études et l'utilisation classique des équations de Ramser, SACCARDY (1950), Bourgeat et autres selon lesquelles la fréquence des terrasses doit augmenter avec l'inclinaison de la pente (LEFAY, 1986).

TABLEAU III
Influence de la pente et du type de sol sur le ruissellement et l'érosion sur une jachère nue.
D'après ARABI et ROOSE (1992) et MAZOUR (1992)
Influence of slope and of the soil type on runoff and erosion on bare soil.
After ARABI and ROOSE (1992) and MAZOUR (1992)

Type de sol	Surf. couv. par les cailloux (%)	Pente (%)	Kram (%)	Krmax	E (t/ha/an)
Ouzera					
Vertisol gris	4	12	21	86	2,3
Sol fersiallitique rouge	0	30	20	57	12,0
Sol brun calcaire colluvial	20	35	12	36	2,5
Sol brun calcaire sur versant	16	40	11	34	2,7
Tlemcen					
Sol vertique gris	5	15	10	39	5,7
Sol vertique gris	4	20	6	25	2,4
Sol vertique gris	3	30	7	27	2,5

Influence de l'amélioration des systèmes culturaux (tabl. IV)

L'amélioration du couvert végétal (densité, fertilisation, rotation avec des légumineuses, cultures intercalaires sous la vigne et les abricotiers) a réduit plus ou moins fortement les risques d'érosion et de ruissellement. Mais le résultat le plus important concerne l'amélioration très significative des rendements des cultures et des revenus des agriculteurs.

À Ouzera, où les expériences sont plus avancées, les rendements observés sur les parcelles d'érosion soumises aux systèmes traditionnels sont aussi médiocres que sur les champs des paysans voisins : 7 q/ha pour le blé d'hiver, 28 q/ha pour le raisin et 8 q/ha pour les abricots, les abricotiers étant malades. Sur les parcelles d'érosion situées juste à côté, grâce aux techniques culturales améliorées, les rendements ont atteint, en culture pure, 48 à 65 q/ha pour le blé, 40 q/ha pour le raisin, 10 q/ha pour les abricots, et en plus, en cultures associées, 34 q/ha de fève et 30 q/ha de blé.

En même temps, la production de paille, de feuilles de légumineuses et autres résidus de culture a augmenté

significativement (de 0,2 à 2 ou 3 t/ha/an) : cette biomasse supplémentaire peut à son tour améliorer la production animale ainsi que la disponibilité en fumier et compost, si nécessaire pour entretenir la fertilité du sol, la stabilité structurale, la capacité d'infiltration et la résistance à l'érosion.

Il est vraisemblable que l'amélioration des rendements ne sera pas aussi spectaculaire sur les grandes surfaces en milieu paysan que sur les petites parcelles de 100 m², mais le premier pas est franchi qui consistait à démontrer qu'il est possible à la fois d'intensifier l'agriculture de montagne et de réduire les risques de dégradation de l'environnement rural. Des résultats similaires ont été obtenus par quelques paysans à Ouzera et à Tlemcen sur des champs d'un hectare (MAZOUR, 1992).

L'étape suivante consiste à démontrer que ces changements sont rentables pour le paysan, condition essentielle pour que l'effort d'intensification soit accepté avec la lutte antiérosive. Si on soustrait du chiffre d'affaires le prix des intrants supplémentaires (graines sélectionnées, engrais, pesticides, herbicides, travail supplémentaire pour les soins à la culture et à la récolte), il reste au paysan un

TABLEAU IV
Effet de l'amélioration des systèmes culturaux sur le ruissellement,
l'érosion, le rendement et le revenu annuel net à Ouzera (1 dollar US = 30 dinars).
D'après ARABI et ROOSE, 1992
*Effects of the improvement in crop systems on runoff, erosion, production
and annual net income at Ouzera (after ARABI and ROOSE, 1992)*

Systèmes		Kram (%)	Krmax (%)	Érosion (t/ha/an)	Rendements (q/ha)	Revenus nets (dollars US)
Agropastoral sur vertisol	Traditionnel	2,4	14	0,23	7 b + 2,3 p	250
	Amélioré	0,9	5	0,05	48 b + 22 p + 70 f + 27 rc	2 500
Sylvopastoral sur sol brun	Dégradé	15	25	2,0	---	17
	Reforesté	0,6	2	0,05	--	forfait
	Enherbé	1,0	4	0,03	---	forfait
Verger sur sol rouge	Traditionnel	5,0	12	0,9	11 a	605
	Amélioré	0,7	3	0,1	10 a + 64 f + 33 b + 19 rc	3 000
Vigne sur sol brun colluvial	Traditionnel	2	8	0,2	29r	2 500
	Amélioré	0,2	2	0,01	37 r + 37 f/29 b + 4 rc	5 100

b = blé, p = paille, f = fèves, rc = résidu de culture, a = abricot, r = raisin.

revenu net par hectare largement supérieur à celui qu'on peut obtenir avec les cultures traditionnelles :

- pâturage extensif en zone forestière : 17 dollars ;
- blé d'hiver traditionnel suivi d'une jachère pâturée : 250 dollars ;
- rotation intensive blé-légumineuse fourragère : 2 400 dollars ;
- rotation intensive blé-fève : 2 500 dollars ;
- verger d'abricotiers ou vigne traditionnelle : 605 à 2 500 dollars ;
- verger ou vigne intensive avec culture intercalaire : 3 000 à 5 100 dollars.

Ces résultats montrent qu'en intensifiant le système de production on a multiplié par dix le revenu à l'hectare en produisant des céréales et on l'a multiplié par trois si on cultive déjà des vignes.

Avec un tel bénéfice, les paysans peuvent saisir l'intérêt qu'il y a pour eux à changer de système de production (du blé extensif à la vigne intensive avec blé intercalaire) et à adopter les techniques culturales améliorées, parmi lesquelles sont proposées les techniques antiérosives les mieux adaptées aux conditions écologiques et économiques du paysan. Bien que nous n'ayons pas développé d'action de vulgarisation, les paysans vivant à proximité de nos parcelles expérimentales ont copié avec succès nos méthodes améliorées à Ouzera. Par contre, dans les zones sinistrées par le manque de pluie ces dernières années (moins de 350 mm), le risque d'échaudage en année sèche réduit l'extension de ces pratiques intensives (coût des intrants non valorisés).

CONCLUSION

Les résultats obtenus à partir de l'observation du ruissellement, de l'érosion en nappe, des rendements de biomasse et des revenus nets sur un réseau de 50 parcelles d'érosion réparties dans quatre sites bioclimatiques différents confirment largement les premiers résultats obtenus à la station INRF de Ouzera (ARABI et ROOSE, 1992), à savoir qu'il est techniquement possible d'intensifier la production en montagne méditerranéenne et d'améliorer les revenus des paysans, sans dégrader l'environnement. Mais les résultats les plus récents montrent que cela n'est vrai qu'à condition de recevoir suffisamment de pluies (plus de 400 mm bien répartis).

Or les précipitations et leur agressivité ont été largement déficitaires pendant les années 1984 à 1995 dans la région septentrionale de l'Algérie. Toutefois, même en année normale (1991), le ruissellement moyen et les pertes en terre furent modérés sous matorral pâturé, de même que sous culture (Kram < 10 % et E < 3 t/ha/an) ; seules quelques grosses averses tombant sur un sol saturé ou tassé ont donné lieu à des ruissellements très abondants (30 % à plus de 80 % des pluies). Il se confirme donc que la source des transports solides qui menacent la durée de vie des barrages n'est pas à rechercher dans les phénomènes d'érosion en nappe, mais bien dans le ravinement des versants, les glissements de berge (en particulier autour des lacs) et l'érosion des oueds en crue.

Cependant, la masse d'eau de ruissellement ne peut provenir uniquement de la surface occupée par les ravines et les oueds (moins de 10 %) : elle provient en majorité des

terres saturées, soit superficielles ou découpées, soit tassées par le surpâturage (parcours dégradés ou pistes), ou encore encroûtées par la battance des pluies. On ne peut donc faire l'économie de l'aménagement de toute la surface des bassins versants d'où proviennent les eaux des crues. Mais, au lieu de concentrer les eaux superficielles excédentaires dans des canaux qui risquent de déborder ou de glisser lorsque les versants sont saturés, et de creuser des ravines aux exutoires, nous proposons d'étaler les eaux en nappes et de dissiper leur énergie sur la rugosité des sols, grâce à des haies vives et des talus enherbés (méthode traditionnelle très répandue mais à améliorer) (ROOSE, 1994).

Autre observation importante : la pente n'est pas le facteur essentiel du risque érosif. Malgré des versants très raides (10 à 45%), les risques d'érosion en nappe ont été très modestes. De plus, en région méditerranéenne, les pentes sont liées à la lithologie et au type de sol : les roches dures protègent souvent des pentes fortes et des sols résistants tandis que les roches tendres donnent des sols fragiles sur des pentes plus douces ; les pertes en terre peuvent donc être supérieures sur les pentes modérées. Les sols de montagne, souvent superficiels, sont mélangés à

divers fragments de roche qui vont augmenter leur résistance à la battance des gouttes de pluie et au cisaillement du ruissellement. Par ailleurs, dans les paysages jeunes, l'érosion tend à décaper les sols cultivés plutôt qu'à appauvrir les profils en particules fines : en conséquence, les horizons superficiels sont généralement riches en argiles saturées en calcium et caillouteux, donc peu érodibles. Enfin, le bord des oueds et le bas des collines semblent souvent gravement attaqués par le ravinement remontant, le soutirage et les mouvements de masse.

Il est donc révolu le temps des « conservationnistes » qui aménageaient des bassins versants de plusieurs milliers d'hectares avec une seule méthode (la banquette et ses variantes), sans se soucier de la couverture végétale, ni des techniques culturales, en s'appuyant sur le seul facteur topographique ! Les structures de gestion des eaux de surface peuvent jouer un rôle utile, une fois qu'on a défini le système de production et les risques réels de ruissellement et d'érosion. Chaque versant exige une étude approfondie si on veut intervenir pour stabiliser durablement le paysage et valoriser le travail des hommes qui en vivent.

BIBLIOGRAPHIE

- ARABI (M.), 1991 — *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie)*. Thèse géographie, univ. Grenoble, 272 p.
- ARABI (M.), ROOSE (E.), 1989 — Influence de quatre systèmes de production de moyenne montagne méditerranéenne algérienne. *Bull. Réseau Érosion*, 9 : 39-51.
- ARABI (M.), ROOSE (E.), 1992 — « Water and Soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains ». In : *7th ISCO Conference Proc.* 3, 3 : 341-347.
- AUBERT (G.), 1987 — Érodibilité des sols de la région d'Ouzera. *Bull. Réseau Érosion*, 8 : 97-99.
- BRAHAMIA (K.), 1993 — *Essai sur la dynamique actuelle dans la moyenne montagne méditerranéenne : bassin versant de l'oued Mina (zone de Taassalet), Algérie*. Thèse doct. géographie, univ. Grenoble, 241 p.
- CHEBBANI (R.), MEDEDJEL (N.), BELAÏDI (S.), 1995 — Application de la GCES dans la région de Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 15 : 489-497.
- CLAUZON (G.), VAUDOUR (J.), 1969 — Observations sur les effets de la pluie en Provence. *Annales de Géographie*, 13 (4) : 390-405.
- DELHOUME (J.-P.), 1981 — *Études en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (Djebel Semmama)*. Campagnes 1975 à 1979. Tunis, Orstom/DRE, 187 p. (In : *Processus et mesure de l'érosion*, 1987, CNRS : 487-507).
- DEMMAK (A.), 1982 — Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatiques des bassins. *AISH*, 144 : 403-414.
- GRÉCO (J.), 1979 — *La défense des sols contre l'érosion*. Paris, La Maison Rustique, 183 p.
- HEUSCH (B.), 1970 — L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif Occidental (Maroc). *Annales Recherches Forestières au Maroc*, 12 : 9-176.
- HEUSCH (B.), 1986 — Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 153-162.
- KALMANN (R.), 1976 — *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou*. Rabat, projet Sebou, 40 p.
- KOUIDRI (R.), ARABI (M.), ROOSE (E.), 1989 — Premiers résultats de quantification du ruissellement et de l'érosion en nappe sur jachère en Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 9 : 33-38.
- LAOUIA (A.), 1992 — Recherches actuelles sur les processus d'érosion au Maroc. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 292-299.
- LEFAY (O.), 1986 — *Étude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie*. Mémoire stage, Cnearc/Orstom/INRF, 50 p.
- LE LANDAIS (F.), FABRE (G.), 1996 — Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'oued Ouergha (Maroc). Risques d'érosion et système d'information géographique. *Bull. Réseau Érosion*, 16, sous presse.
- MARTIN (C.), 1975 — L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal. *Rev. Géomorphologie Dynamique*, 24 : 49 - 63.

- MAZOUR (M.), 1992 — Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 300-313.
- MONJAUZE (A.), 1962 — *Rénovation rurale : rôle et dispositifs d'infiltration*. Alger, Délégation générale, département des Forêts, service de DRS, 16 p.
- MORSLI (M.), 1995 — *Les sols de montagne et leur susceptibilité à l'érosion. Cas des monts de Beni-Chougrane*. Thèse de magistère, Ina, Alger, 170 p.
- PIHAN (J.), 1978 — *Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité de Wischmeier relatives aux stations officielles de la Météorologie nationale*. Rennes, Laboratoire Inra/ Université Haute-Bretagne, 110 p.
- PLANTIÉ (L.), 1961 — *Technique franco-algérienne des banquettes de DRS*. Oran, Délégation générale, département des Forêts, service de DRS, 22 p.
- POUGET (M.), 1974 — *Étude agro-pédologique de la région de Ouzera*. Alger, ANRH, 72 p.
- PUTOD (R.), 1956 — La protection des vignes contre l'érosion. *Rev. Agron. Afrique du Nord*, 19 : 567-576.
- REVEL (J.-C.), COSTE (N.), CAVALIÉ (T.), COSTES (J.-L.), 1989-1990 — Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain (France). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 111-118.
- ROOSE (E.), 1968 — *Protocole standard pour les parcelles de mesure de l'érosion en nappe en accord avec le modèle USLE de Wischmeier*. Montpellier, Orstom, 12 p.
- ROOSE (E.), 1972 — « Comparaison des causes de l'érosion et des principes de LAE en régions tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne ». In : *Journées d'études du Génie rural*, Florence, Italie : 417-441.
- ROOSE (E.), 1973 — *Dix-sept années de mesure de l'érosion sur un sol ferrallitique sableux de Côte d'Ivoire*. Thèse doct.-ing., fac. Sciences, Abidjan, n° 20, 125 p.
- ROOSE (E.), 1987 — Évolution des stratégies de lutte antiérosive. Nouvelle démarche proposée en Algérie : la GCES. *Bull. Réseau Érosion*, 7 : 91-96.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), ARABI (M.), 1994 — Intensification de l'agriculture sans dégradation en montagne méditerranéenne. *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 363-370 (« Introduction à la GCES »).
- ROOSE (E.), BERTRAND (R.), 1971 — Contribution à l'étude des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. *Agron. Trop.*, 26 (11) : 1270-1283.
- SACCARDY (L.), 1950 — Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et Eaux*, 11 : 3-19.
- WASSMER (P.), 1981 — *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Étude de l'érosion des sols et de ses conséquences dans la préfecture de Ibuté*. Thèse 3^e cycle, univ. Strasbourg, 144 p.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1978 — *Predicting rainfall erosion losses. A guide to soil conservation planning*. Washington, USDA, Handbook n° 537, 58 p.

ANNEXES

TABLEAU V

Ouzera. Ruissellement annuel (Kram), ruissellement maximal pour une forte averse (K_{rmax}), érosion (E) et rendements sur les versants de l'Atlas blidéen.

D'après KOUIDRI *et al.* (1989), ARABI (1991), ARABI et ROOSE (1992)
Ouzera. Agro-pastoral system on grey vertisol with 12 % slope (1984-1995), mean and maximum runoff, erosion, crop yield and mean net income (b = wheat, f = broad beans, m = medicago, rc = crop residues)

Système agropastoral (blé-jachère pâturée ou fourragère), vertisol gris colluvial. Pente : 12 % ; L = 22,2 x 4,5 à 10 m ; SL = 1,55 ; 2 à 4 % de cailloux, sur marnes gréseuses. Pluies 1984-1991 : 520, 579, 530, 408, 566, 440, 621 mm.

	Pluie (mm)	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (t/ha/an)	Rendement (q/ha)
Témoin sol nu	520	23,0	> 75	0,6	-
travaillé // pente	579	14,8	> 64	0,5	-
	540	26,9	85	1,0	-
	408	4,5	32	1,1	-
	566	20,6	86	1,0	-
	440	20,7	58	6,1	-
	621	25,8	83	3,4	-
Médiane/4 ans	533	21	80	2,3	-
Témoin régional	408	1,6	11	0,25	8 b + 2,7 p
blé-jachère pâturée	566	2,0	8	0,13	-
sans engrais	440	2,8	16	0,20	6 b + 2 p
	621	7,1	23	0,81	-
Médiane	533	2,4	14	0,23	= 250 \$
Amélioré fourrager	408	1,3	9	0,33	34 m
blé-médicago	566	0,5	3	0,01	48 b + 21 p
+ N35 P45 K90	440	0,1	1	0,01	40 m
	621	2,5	6	0,08	51 b + 25 p
Médiane	533	1	5	0,05	= 2 400 \$
Amélioré 2	408	1,2	8	0,17	55 b + 25 p
blé-fève	566	0,6	4	0,01	80 f + 30 rc
+ N35 P45 K90	440	0	0	0	41 b + 17 p
	621	2,5	7	0,07	67 f + 25 rc
Médiane	533	0,9	5	0,04	= 2 500 \$

b = blé, f = fève, m = médicago, rc = résidus de culture.

Vertisol battant : provoque beaucoup de ruissellement (> 85 % si grosses pluies).

Érodibilité : K = 0,013 (très résistant à l'érosion en nappe, mais sensible au ravinement).

Grande efficacité du couvert végétal (C de usle) : blé-jachère traditionnelle = 0,10 ; blé-fourrage intensif = 0,02 ; blé-fève intensif = 0,02.

Revenus moyens annuels : 250 \$ si blé traditionnel ; 2 400 \$ si blé + fourrage intensif ; 2 500 \$ si blé + fève intensif.

TABLEAU VI

Ouzera. Verger de montagne, sol fersialitique rouge sur grès calcaire.
 Pente : 35 % ; L = 22,2 x 10 m ; SL = 9,66 ; 0 % de cailloux.
 Pluies : 408, 566, 440, 621 mm (médiane = 533 mm)
*Ouzera. Orchard of apricot trees with companion crops,
 on red fersialitic soils (slope 35 %), 1987-1991*
 (b = wheat, f = broad beans, a = apricot, rc = crop residues)

	Kram (%)	Krmax (%)	E (t/ha/an)	Rendement (q/ha)
=Témoin sol nu	5	26	2,0	0
travaillé // pente	14	29	4,8	0
	28	50	20,4	0
	25	57	18,6	0
Médiane	20	40	12	0
Témoin régional	2	12	0,4	15 a
verger traditionnel	4	11	0,3	12 a
2 labours croisés	5	13	1,4	8 a
sol sarclé	11	17	1,9	6 a
Médiane	5	13	0,9	11 a
=				
Verger amélioré,	1,2	10	0,3	68 f+ 15 a + 25 rc
blé-fève intercalaire	0,5	3	0	35 b = 12 a = 17rc
+ NPK	0,1	1	0,1	60 f + 8 a + 20 rc
bandes enherbées	2,0	3	0,1	30 b + 6 a + 15 rc
Médiane	0,7	3	0,1	64 f/33 b + 10 a/19rc

b = blé, f = fève, a = abricot, rc = résidus de culture.

Sol fersialitique plus fragile, battant et moins de matière organique.

Érodibilité : $K_{usle} = 12/50 \times 2,24 \times 9,66 = 0,011$ à $0,020$.

La culture intercalaire a amélioré l'efficacité protectrice du verger x 2 labours perpendiculaires.

C verger traditionnel = 0,07 ; verger + culture intercalaire = 0,01.

Malgré la forte pente, l'érosion en nappe n'a pas dépassé 20 t/ha/an, mais elle augmente d'année en année.

Revenus : 605 \$ en moyenne sur vergers d'abricotiers ; 3 000 \$ si abricotiers + culture intercalaire intensive.

TABLEAU VII

Ouzera. Système sylvopastoral (forêt dégradée pâturée, à oliviers, chênes verts, pins d'Alep).
Pente : 0 % ; L = 22,2 x 10 m ; sol brun calcaire à 16 % de cailloux.

Pluies : 408, 566, 440, 621 mm (médiane = 533 mm)

*Ouzera. Sylvo-pastoral system of degraded forests on calcareous brown soil (slope 40 %),
degraded matorral, reforestation, meadow restoration and bare soil (1987-1991)*

	Kram (%)	Krmax (%)	E (t/ha/an)	Revenu (US \$)
Témoin sol nu	-	-	-	-
travaillé // pente	11,4	21	0,9	-
	11,5	34	2,7	-
	15,4	33	3,6	-
Médiane	12	33	2,7	0
Matorral dégradé	6,7	21	1,4	
pâturé traditionnel	14,9	25	1,7	
	16,6	23	2,1	
	21,2	29	2,5	Forfait
Médiane	15	24	2,0	177 \$
Matorral amélioré	0,4	3	0,04	
reforestation	0,8	2	0,02	
pins d'Alep	0,4	1	0,06	
litière complétée	1,2	2	0,08	Forfait
Médiane	0,6	2	0,05	177 \$
Matorral amélioré	1,0	7	0,04	
défrichage	1,0	4	0,02	
restauration prairie	0,5	2	0,04	
	1,7	3	0,01	Forfait
Médiane	1,0	4	0,03	177 \$

Le forfait correspond à la croissance d'un troupeau de moutons paissant sur le parcours.

Le sol brun calcaire profond et caillouteux est très résistant.

Érodibilité Kusle = $2,7/50 \times 2,24 \times 12,33 = 0,002$.

Malgré la pente très raide, les pertes en terre restent très limitées (3 t/ha/an).

Le couvert végétal, en particulier la litière, est très efficace à la fois pour protéger du risque de ruissellement ($Kr_{max} < 7 \%$) et de l'érosion ($E < 0,1$ t/ha).

TABLEAU VIII

Ouzera. Vigne sur sol brun colluvial, 20 % de cailloux. Pente : 35 % ;
L = 22,2 x 4,5 m ; SL = 7,31. Pluies : 408, 566, 440, 621 mm (médiane = 530 mm)
Ouzera. Vineyard on colluvial calcareous brown soil, slope 35 % (1987-1991)

	Kram (%)	Krmax (%)	E (t/ha/an)	Rendement (q/ha)
Témoin sol nu	-	-	-	0
2 labours // pente	11,6	36	0,8	0
	7,4	16	2,3	0
	15,3	32	3,6	0
Médiane	12	32	2,5	0
Vigne traditionnelle	0,2	3	0,02	30 r
2 labours perp. pente	2,4	8	0,21	27 r
terrassettes	1,9	7	0,12	28 r
	3,3	14	0,29	32 r
Médiane	2	8	0,2t	29 r = 2 500 \$
Vigne non travaillée	0,9	19	0,02	35r
herbicides	7,2	26	0,02	31 r
terrassettes	4,8	8	0,06	25 r
	6,7	15	0,07	32 r
Médiane	6	17	0,04	31 r = 3 000 \$
Vigne améliorée	0,1	2	0,01	33 r+42 f+6 rc
travaillée perp. pente	0,4	3	0,01	38 r+28 b+3 rc
terrassettes	0	0	0	40 r+34 f+4r c
fève-blé intercalaire	0,6	1	0,01	37 r+30 b+3 rc
Médiane	0,2	2	0,01t	37 r +37 f/29 b+4 rc = 5 100 \$

r = raisin, b = blé, f = fève, rc = résidus de culture.

Sol brun calcaire caillouteux très résistant à la battance. Érodibilité : Kusle = 0,003 à 0,004.

Le travail du sol a réduit le ruissellement, mais peu changé l'érosion.

Le couvert végétal et les terrassettes ont été très efficaces :

C vigne sur terrassettes = 0,08 ; idem + non-labour = 0,002 ; idem + culture + labour = 0,001.

TABLEAU IX

Oued Mina. Ruissellement annuel moyen (Kram), ruissellement maximal lors d'une grosse averse (K_{rmax}) et érosion (E), sur les versants de l'oued Mina (zone de Taassalet).

D'après BRAHAMIA, 1993

Oued Mina. Wheat/peas and fodder on vertic brown soils or on rendzina soils. Slope of 9, 21, 30 % (1989-1992)

Frahia I. Sol brun calcaire vertique sur marne. Pente : 9 % ; L = 22,5 m ; SL = 1.
Pluies : 106, 96, 44 mm ; R_{USA} = 19,1, 15,5, 6,4 ; K calculé = 0,010.

	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (kg/ha/an)
1. Jachère nue, trav. à plat	1,9-0,6-0,6 (1,2)	3,6-1,1-1,0	721-27-48 (300)
2. Orge cultivée à plat	1,3-0,4-0,2 (0,8)	2,5-0,7-0,5	500-99-29 (210)
3. Pois sur billons -I- pente	1,1-0,3-0,2 (0,6)	1,9-0,7-0,5	144-82-30 (85)

K calculé = 0,010

M'Hallet. Sol brun calcaire vertique sur marne. Pente : 21 % ; L = 22,5 m ; SL = 3,9.
Pluies : 96, 86, 41 mm ; R_{USA} = 16,7, 20,8, 7,2 ; K calculé = 0,005.

	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (kg/ha/an)
4. Jachère nue, trav. à plat	3,2-4,4-2,3 (3,6)	7,7-15,2-4,3	870-1 105-234 (736)
5. Orge cultivée à plat	1,3-1,1-1,3 (1,2)	3,2-3,4-2,2	434-230-77 (247)
6. Pois sur billons -I- pente	0,9-0,9-1,5 (1,0)	2,0-2,9-3,5	300-126-61 (162)

Frahia II. Rendzine sur marno-calcaire. Pente : 30 % ; L = 50 m ; SL = 10,9.
Pluies : 81, 95, 188 mm ; R_{USA} = 15,3, 16,3, 70,7 ; K calculé = 0,002.

	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (kg/ha/an)
7. Orge cultivée à plat	3,0-0,7-3,2 (2,5)	5,8-1,5-13,0	886-63-1031 (660)
8. Bandes enherbées	1,9-0,8-2,3 (1,8)	4,7-1,5-8,9	411-54-643 (370)

Pluies très déficitaires.

Ruissellement très faible (1 à 4 % en moyenne annuelle), au maximum 15 % pour un orage sur sol nu et pente forte (> 20 %).

Érosion en nappe très modeste sur les sols labourés (E = 30 à 1 105 kg/ha).

Effet sol important, bien que tous les sols aient bien résisté à la battance en années déficitaires.

Effet pente (% et longueur) peu marqué sur l'érosion, un peu plus sur le ruissellement ; difficile de séparer ce qui revient au sol de ce qui revient à la pente.

Effet couvert végétal : C orge = 0,35 ; C pois = 0,22.

TABLEAU X

Mascara (campagnes 1993-1994 et 1994-1995). Ruissellement annuel (Kram), ruissellement maximal au cours d'une grosse averse (K_{rmax}), perte en terre (E) et rendement des cultures, sur sol brun calcaire limoneux. Pente : 20 % ; pluie : 241 et 320 mm. D'après MORSLI, 1995
Ain-Fares near Mascara. Cereals, peas, fodder and fallows on calcareous brown soil, slope of 20 %, and vertisol, slope of 45 % (1993-1995)

Coordonnées Lambert : X = 274,600 ; Y = 249,210. Altitude : 560 m.

Sol brun calcaire limoneux sur grès calcaire. Pente : 20 % ; SL = 3,59.

	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (t/ha/an)	Rendement (q/ha)		
				A	B	C
Jach. nue, trav. standard	6,4/-7	27/-28	2,5/-3,52			
Orge tradition. + engrais	2,2/-3	11/-13	0,6/-0,25	12	3 à 6	2
Orge sélect. + engrais	1,6/-2	10/-12	0,6/-0,65	8		
Petits pois + engrais	2,5/-2	8/-10	0,7/-0,40	4,3	2	2
Jachère nat. non travaillée	4,2/-3,1	27/-16	1,4/-0,15	19	10 en vert	

Sol brun vertique argileux (60 %) sur marne. Pente : 45 % ; SL = 15,34

				A	B	C
Jach. nue trav. standard	2,6/-6,5	18/-30	1,5/-2,65			
Blé tradition. + engrais	0,6/-3	3/-22	0,4/-1,0	7	0 à 4	1
Blé sélection. + engrais	0,7/-3	3/-22	0,4/-0,8	8,6		
Pois chiche peu dense	1,6/-3,5	15/-24	0,8/-2,1	1,1	0,7	< 0,2
Culture fourragère (<i>Sulla</i>)	1,4/-3,3	6/-22	0,6/-0,78			

A : rendement dans la parcelle d'expérimentation.

B : rendement moyen des paysans la même année et sur le même sol.

C : rendement lors d'une année déficitaire.

Fertilisation : N 20 + P 45 (= 50 kg/ha d'ammonitrate + 100 kg de superphosphate).

Avec les pluies très déficitaires, la couverture du sol a été très clairsemée pour les pois et la culture fourragère.

Grâce à la culture améliorée par les engrais, l'orge et le blé ont mieux réussi, mais sans donner aux graines sélectionnées l'occasion de démontrer leur meilleure productivité.

Facteur cultural : C blé et orge = 0,25 ; C pois et pois chiche = 0,3 à 0,5 en fonction de la sécheresse.

Érodibilité du sol calculée : $K = E / R \times SL \times 2,24$; K brun calcaire = 0,0129 ; K brun vertique = 0,0018 (soit sept fois plus résistant).

Facteur topographique : $SL = VL (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2) / 100 = 3,59$ pour p = 20 % ; 15,34 pour p = 45 %.

Caractéristiques des sols des parcelles (sur 20 cm)

	Argile (%)	Limon (%)	SF (%)	SG (%)	MO (%)	Calc. (%)	Cailloux (%)	Is	K (érodibilité nomographe)
Brun calcaire	17	56	20	6	1,8	30	5	45,7	0,33
Brun vertique	57	36	5	2	2,5	20	-	0,57	0,17

TABLEAU XI

Ruissellement annuel moyen (Kram), ruissellement maximal (K_{rmax}) et érosion (E)
sur les versants de l'oued Isser (Sidi Abdelli, à l'est de Tlemcen).

D'après MAZOUR (1992) et CHEBBANI *et al.* (1995)

*Sidi Abdelli near Tlemcen. Agro-sylvo-pastoral system on grey vertic,
calcareous brown or fersiallitic red soils, slope from 10 to 30 % (1989-1993)*

Heriz. Système agropastoral (blé-jachère pâturée) ; sol vertique gris sur marnes.
Pente : 15 % ; L = 22,2 x 4,5 m ; SL = 2,22 ; 5 % de cailloux. Pluies : 354 mm
en 1989-1990, 321 mm en 1990-1991 et 242 mm en 1992-1993 ; R_{USA} = 25 à 36.

	Kram (%)	K _{rmax} (%)	E (t/ha/an)
Témoin nu labour + sarclage/mois	9,8/6,8	39/27	5,7/2,2
Blé-jachère tradition. travail dans le sens pente	7,5/6,1	30/13	3,0/0,9
Blé intensif + NP travail perp. pente	5,6/2,2	22/9	1,9/0,4
Blé dur-jachère	6,5/5,3	26/21	2,7/1

Cherif A. Système agropastoral (blé-blé ou jachère) ; sol vertique gris sur marnes.
Pente : 30 % ; L = 22,2 x 4,5 m ; SL = 7,31 ; 3 % de cailloux.
Pluies : 354 mm en 1989-1990, 321 mm en 1990-1991 ; R_{USA} = 25 et 39.

Témoin sol nu	6,9	27	2,5
Blé-jachère tradit. //	5,3	14	1,9
Blé intensif + NP	7,2	28	2,1

Cherif B. Système agropastoral (blé-jachère ou vesce-avoine), sol vertique gris sur marnes ;
Pente : 20 % ; L = 22,2 x 4,5 m ; SL = 3,59 ; 4 % de cailloux.
Pluies : 354 mm en 1989-1990, 321 mm en 1990-1991 ; R_{USA} = 25 et 39.

Témoin sol nu	6,1	25	2,4
Blé-jachère tradit., travaux //pente	5,6	22	1,8
Blé-vesce-avoine intensif + NP	6,5	26	3,5

Madjoudj. Système sylvopastoral (matorral dégradé pâturé ou en défens),
sol brun calcaire érodé. Pente : 21 % ; L = 22,2 x 4,5 m ; SL = 3,90 ; 46 % de cailloux.
Pluies : 274 mm en 1989-1990, 386 mm en 1990-1991 ; R_{USA} = 18 et 36.

Témoin sol nu	5,4	29	3,3
Matorral dégradé, pâturé	1,0	7	0,3
Matorral en défens, enrichi	0,9	6	0,3
Matorral en défens (oliviers, genêts, chênes)	1,1	5	0,4

Gourari. Système pastoral (matorral très dégradé à Diss et Chamerops),
sol rouge fersialitique. Pente : 10 % ; L = 22,2 x 4,5 m ;
SL = 1,17 ; 42 % de cailloux. Pluies : 555 mm en 1990-1991 ; R_{USA} = 80.

Témoin sol nu, travaillé, sarclé	13,6	27	5,2
Matorral très dégradé, pâturé	15,2	25	2,1
Matorral très dégradé, mis en défens	15,8	30	1,9

Effets des techniques culturales sur le ruissellement, 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 (Mbissiri, 1991-1992)

Baboule Zachée BOLI (1), Éric ROOSE (2), Benjamin BEP A ZIEM (3), Kallo SANON (4) et Florent WAECHTER (5)

- (1) Ira, BP 163, Foumbot, Cameroun.
(2) Centre Orstom, BP 5045, Montpellier cedex 1, France.
(3) Ira, BP 33, Maroua, Cameroun.
(4) Inera, BP 7192, Ouagadougou, Burkina.
(5) 42, rue Rabelais, 67200 Strasbourg, France.

RÉSUMÉ

Sur les sols ferrugineux sableux de la savane soudanienne du Nord-Cameroun, l'intensification des cultures du cotonnier et des céréales fait appel au labour à la charrue, aux engrais minéraux, aux herbicides, à la protection phytosanitaire et aux variétés améliorées. Elle aboutit à la dégradation des terres quand l'érosion n'est pas suffisamment contrôlée : il s'ensuit un éloignement des blocs de culture. Pour sélectionner des systèmes de culture intensifs et durables, les auteurs ont installé un dispositif très complet (57 parcelles d'érosion de 100 à 1 000 m², six lysimètres, etc.) qui permet d'évaluer l'érosion, le bilan d'eau et de nutriments ainsi que les rendements, sous une dizaine de techniques culturales et divers modes de gestion des matières organiques.

Les résultats des deux premières campagnes sont présentés, en groupes de traitements relativement stables. Sous la savane, le ruissellement ($K_{ram} = 0,7$ à 3 %) et l'érosion (0,5 à 3 t/ha/an) sont modestes, même si la savane est pâturée et brûlée.

En milieu cultivé, les résultats sont très variables selon que le sol est nu ou couvert, compact ou ameubli. Les parcelles labourées ruissellent et s'érodent le plus ($K_{ram} = 30$ à 35 % ; $E = 10$ à 24 t/ha/an), mais donnent les meilleurs rendements. Les parcelles en semis direct, couvertes de résidus de culture, s'érodent modérément ($K_{ram} = 4$ à 10 % ; $E = 2,2$ à 7 t/ha/an), selon la disponibilité en biomasse. Malgré des pertes en eau et en terre modestes, les rendements en maïs sont souvent plus faibles (10 à 40 % de grain en moins que sur les parcelles labourées) : le tassement du profil et l'abondance de l'infiltration seraient les principales causes de cette réduction. Sous coton, les différences sont parfois positives sur les sols non dégradés mais négatives sur les sols dégradés.

Il existe des interactions entre l'influence de la pente et celle des états de surface. Lorsque le sol est bien couvert (par exemple, les parcelles paillées et le semis direct avec résidus de culture en surface), l'érosion n'a pas tendance à augmenter avec la longueur de pente, ni avec l'inclinaison : il semble que ni la vitesse, ni l'énergie du ruissellement n'augmentent, grâce à la rugosité de la litière. En revanche, lorsque le sol est mal couvert (par exemple, les parcelles labourées), les risques d'érosion augmentent rapidement avec la pente. Aucun effet d'échelle n'est apparu avec l'augmentation de la surface expérimentale de 100 à 1 000 m² ; mais il faudra confirmer ces résultats dans les années à venir et les vérifier à l'échelle du versant, du terroir et surtout du bassin versant.

Les matières organiques enfouies n'ont pas eu d'effet visible sur les risques d'érosion de ces deux premières années, mais l'action à court terme sur les rendements peut être spectaculaire. Seule la biomasse étalée à la surface du sol réduit fortement l'érosion. Le labour (surtout avec un peu de fumier) produit bien, mais pour combien de temps ? Le semis direct protège bien le sol, mais la productivité est variable en fonction de la culture et de la pluviosité. À l'avenir, on cherchera à améliorer le travail sur la ligne de plantation et à fractionner la fumure en fonction des risques de drainage, à couvrir le sol par une plante de couverture (légumineuse) ou par les herbes naturelles grillées au paraquat. Une autre solution consiste à alterner le labour avant maïs avec le semis direct du cotonnier l'année suivante.

MOTS CLÉS : Nord-Cameroun — Érosion — Ruissellement — Production végétale — Gestion de la biomasse — Dégradation des sols — Restauration de la productivité — Techniques culturales — Haies vives — Pente — Savane soudanienne — Feu — Pâturage — Coton — Maïs.

ABSTRACT

EFFECTS OF CULTURAL PRACTICES ON RUNOFF, SOIL EROSION AND YIELD OF COTTON AND MAIZE ON A SANDY ALFISOL. INTENSIVE AND SUSTAINABLE CROPPING SYSTEMS RESEARCH IN THE SUDANESE ZONE OF NORTH-CAMEROON

On tropical sandy ferruginous soils of the sudanese savanna of North-Cameroon, intensive cropping of annual weeded crops like cotton and maize by plowing, fertilizing, protecting crops and the use of improved varieties cannot prevent soil productivity decrease when erosion prevention is neglected. To assess intensive and sustainable cultural practices, the authors have built a very comprehensive device (57 runoff plots of 100 to 1000 m², six lysimeters, etc.) allowing to quantify erosion, water and nutrients balances, losses by runoff and leaching, yields of biomass and the impact of a dozen of cultural techniques and four biomass management practices. Results from the first two years of experimentation were similar as concern their ranking based on their effects on runoff, erosion under cotton and maize. Runoff ($K_{ram} = 0.7$ to 3 %) and erosion (0.5 to 3 t/ha/year) are moderate under the savanna, even when subjected to early bushfire and grazing.

In cultivated area, results vary according to surface topsoil status (sealing crusts area, litter, green cover...) and compaction of degraded soil profile. Ploughed plots give highest runoff ($K_{ram} = 30$ %) and erosion ($E = 10$ to 24 t/ha/year), however, they produce better yields of maize than no-tillage, chiefly on degraded soils. No-tilled plots, covered with cropping residues, got a better infiltration capacity ($K_{ram} = 4$ to 10 %) and lost less eroded soil ($E = 2$ to 7 t/ha/year) but produced 10 to 40% less corn because poor development of the root system and high infiltration.

Interactions between the effects of slope and of surface status have been observed. When the soil is well covered (mulched, or direct seeding under abundant crops residues) erosion does not increase with the slope length, nor with the slope gradient. Because of the litter roughness, the speedness and the runoff energy are not increasing. But when the soil is not well covered (plowed plots) erosion risks increase fastly with the slope. No scale effect has been observed between 100 and 1,000 m²: these results must be confirmed next years and later on hillslopes and watersheds.

It has been noticed that buried organic matter like crop residues, and farm manure had no significant immediate effect on erosion, but the increase of yield was spectacular on manured plots when erosion did not carry it away. Only biomass spread on the soil surface decreases runoff and erosion significantly on conventional tillage plots: but the cost of mulching is too high for the farmers in terms of labour time.

For the future, research will try to improve tillage limited to the plantation lines, to limit erosion risk by covering the plowed horizon with a leguminous seeded under the maize, or with natural weeds burned by paraquat when 20 cm high. If the soil is covered, infiltration increases and it becomes necessary to split up fertilization in relation with leaching risks by drainage waters. An other alternative is plowing before maize and no-tillage on cotton the next year.

KEYWORDS : North-Cameroon — Runoff — Erosion — Soil productivity degradation — Cultural practices — Biomass management — Cotton-maize rotation — Slope effects — Living hedges — Sudanese savannah — Fire — Grazing.

RESUMEN

EFFECTOS DE LAS TECNICAS DE CULTIVO SOBRE EL ESCURRIMIENTO, LA EROSIÓN Y LA PRODUCCIÓN BAJO ALGODON Y MAÍZ EN UN SUELO FERRUGINOSO ARENOSO TROPICAL. ELABORACIÓN DE SISTEMAS DE CULTIVO INTENSIVOS Y DURABLES EN LA AREA « SUDANOSA » DEL NORTE-CAMERÚN (MBOSSIRI, 1991-1992)

En los suelos ferruginosos arenosos de la savana del Norte-Camerún, la intensificación de los cultivos de algodón y cereales (arado, abonos minerales, protección fitosanitaria, variedades mejoradas) no impide la degradación del suelo cuando la erosión no es suficientemente controlada. Poco a poco las parcelas cultivadas se alejan del pueblo. Para elaborar y seleccionar sistemas de cultivo intensivos y durables, los autores instalaron un dispositivo muy completo (57 parcelas de escurrimiento de 100 hasta 1 000 m² y 6 lisímetros, etc.) que permite medir la erosión, los balances hídrico y de nutrientes así como los rendimientos bajo una decena de técnicas de cultivo diferentes y varias modalidades de gestión de la materia orgánica.

Los resultados de los dos primeros años son presentados en grupos de tratamientos bastante estable. Bajo sabana, el escurrimiento (Kram = de 0,7 hasta 3 %) y la erosión (E = de 0,5 hasta 3 toneladas/hectarea/año) son débiles aun cuando la sabana esta paturada y quemada.

En parcelas cultivadas, los resultados varían mucho según la cobertura y la estructura (compacta o mullidura) del suelo. Las parcelas aradas son las que chorrean y corroen más (Kram = de 30 hasta 35 %, E = de 10 hasta 24 t/ha/año) pero dan los mejores rendimientos. Los terrenos de labranza cero, cubiertos de residuos de cultivo, corroen moderadamente (Kram = de 4 hasta 10 %, E = de 2,2 hasta 7 t/ha/año) según la disponibilidad en biomasa. Apesar de pérdidas en suelo y agua moderadas, los rendimientos de maíz, aménudo, son menores (se observa una disminución de 10 hasta 40 % del rendimiento en granocomparativamente con las parcelas aradas), en estos suelos apisonados el arraigamiento es demasiado superficial. Bajo algodón las diferencias son a veces positivas en los suelos recién cultivados pero negativas en los suelos degradados.

Existe interacciones entre las influencias de la pendiente y del estado superficial del suelo. Cuando el suelo tiene una buena cobertura vegetal (por ejemplo las parcelas esparcidas con pajas o las parcelas de labranza cero con residuos de cultivos en el suelo) la erosión no se incrementa con la longitud así como la inclinación de la pendiente : parece que no aumenta la velocidad y energía del escurrimiento a causa de la rugosidad de la litera. En cambio cuando el suelo esta desnudado (parcelas aradas) los riesgos de erosión crecen rápidamente con las características de la pendiente (longitud y %). No se encontró efecto de escala cuando la superficie experimental cambia de 100 hasta 1 000 m², pero estos resultados tendran que ser confirmado en los próximos años y verificados al nivel de la vertiente, del « terroir » y sobre todo de la cuenca.

Las materias orgánicas incorporadas no indujeron efectos patentes sobre el riesgo erosión en los dos primeros años pero su acción a corto plazo sobre los rendimientos es espectacular. Únicamente la biomasa desplegada a la superficie del suelo reduce poderosamente la erosión. La labranza (sobre todo cuando se le añade un poco de estiércol) produce bien pero hasta cuando ? La labranza cero asegura la protección del suelo pero los rendimientos son débiles a causa de un arriego limitado en estos terrenos arenosos y rápidamente apisonados. En el futuro se mejorará el trabajo sobre la línea de siembra, el fraccionamiento de los abonos minerales en función de los riesgos de drenaje, el recubrimiento del suelo arado por una planta de cobertura (leguminosa) o por las hierbas naturales destruidas con un producto químico (paraquat). La rotación, labranza antes del maíz y siembra directa (labranza cero) para el algodón, puede ser una otra alternativa.

PALABRAS CLAVES : Erosión — Escurrimiento — Producción vegetal — Gestión de la biomasa — Degradación de los suelos — Setos vivos — Longitud y % de la pendiente — Sabana de precipitaciones favorables a la producción — Fuego — Pastoreo — Algodón — Maíz — Norte-Camerún.

PROBLÉMATIQUE

Les difficultés alimentaires et la rareté des terres deviennent de plus en plus aiguës pour certaines populations du Cameroun. Il y a cinquante ans, la culture cotonnière a été développée dans la zone soudano-sahélienne du Nord-Cameroun (fig. 1), mais depuis les années soixante-

dix on observe sa migration vers la zone soudanienne, plus humide. On peut invoquer deux raisons : une réduction de 30 % des précipitations, mais surtout la dégradation de la productivité des sols soumis à la culture intensive du cotonnier, des céréales et de l'arachide, avec labour à la charrue et usage d'engrais acidifiants.

La croissance de la population est désormais plus rapide que celle de la production vivrière. Pour faire face à ce problème préoccupant, les structures étatiques proposent l'intensification et la mécanisation de l'agriculture. On peut alors se poser certaines questions. Quelle est la mécanisation adaptée à l'Afrique intertropicale ? Pourquoi la charrue introduite en Afrique il y a plus d'un demi-siècle n'a-t-elle pas apporté la prospérité qu'elle a donnée aux régions tempérées ? Tirée par des bœufs ou par un tracteur, la charrue est bien connue dans les stations expérimentales et les fermes d'État. Mais, en dehors des stations de recherche, elle n'a pas permis de s'affranchir de la culture

itinérante, suite à la dégradation des terres par l'érosion.

L'expérience de la Société de développement du coton dans la zone soudanienne du Nord-Cameroun ne semble pas échapper à cette règle. Depuis quelques années, en effet, des blocs de culture qui ne produisent plus assez de coton, malgré les apports d'engrais minéraux, sont déclassés. De nouvelles terres sont désenclavées et défrichées pour tenter de maintenir la production, solution qui consacre le retour à la culture itinérante, laquelle est inadaptée au contexte actuel du développement, car les villages se fixent et la terre arable n'est plus indéfiniment extensible (BOLI *et al.*, 1991).

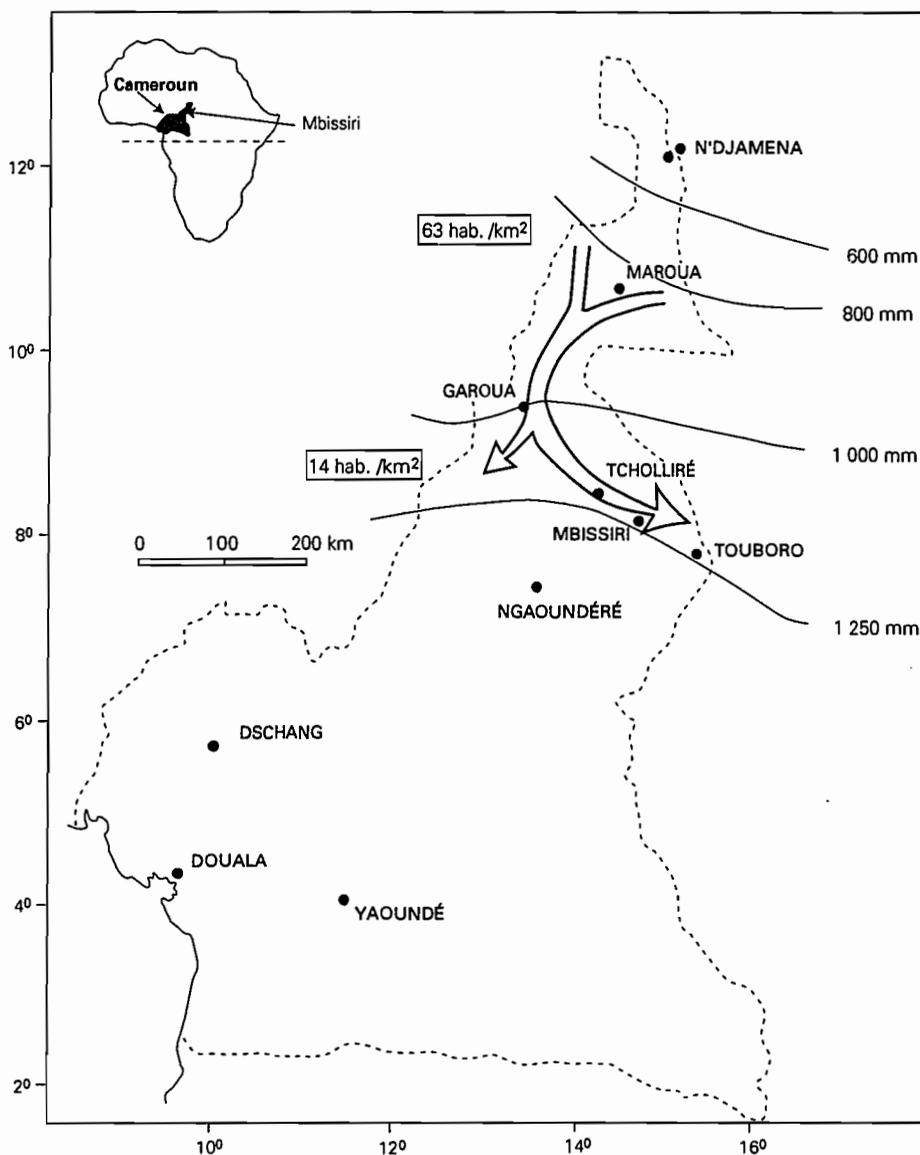


FIG. 1. — Carte de situation, des précipitations annuelles moyennes et des migrations.
Location map including mean annual rainfalls and migrations.

Si l'on rapproche les données de l'évaluation des terres de savane de basse altitude du Nord-Cameroun (BRABANT et GAVAUD, 1985) de celles du recensement du Cameroun en 1987, on observe qu'il n'y a aujourd'hui que deux hectares de terre arable disponibles par habitant. Le développement de systèmes de culture intensifs et durables devient une urgence.

L'enquête préliminaire (BOLI *et al.*, 1991), visant à comprendre l'origine de la baisse de productivité des terres a souligné l'importance du déséquilibre du bilan des matières organiques : celui-ci entraîne la dégradation des propriétés physiques, l'augmentation du ruissellement et de l'érosion et finalement la fatigue du sol, incapable de stocker l'eau et les nutriments indispensables à la culture intensive. Les pratiques culturales sont mises en cause, en particulier le labour, qui expose le sol nu à l'agressivité des premiers orages, et la culture en blocs sur de grandes longueurs de pente. Le labour profond (20 à 25 cm) réalisé par une charrue à socs offre l'avantage de préparer un lit de semences très propre, de favoriser une levée régulière du semis, d'enfouir la fumure organique et minérale et de réduire la pression des adventices pendant les premiers stades de la culture. Malheureusement, ce labour « conventionnel » a l'inconvénient d'exposer à la battance des pluies les matériaux profonds du sol, pauvres en matières organiques, de diluer celles-ci et d'accélérer leur minéralisation, de réduire la cohésion du sol, donc sa résistance à l'érosivité des pluies et, en définitive, de favoriser le ruissellement, l'érosion et la dégradation de l'état de surface du champs (ROOSE, 1981 ; LAL, 1983 ; DICKEY et SHELTON, 1987).

Les chercheurs qui ont étudié le problème du travail du sol dans les régions forestières ou soudano-sahéliennes voisines aboutissent à des conclusions divergentes. À la place du labour, trop dégradant en zone guinéenne, LAL (1983) préconise le « non-travail du sol recouvert de litière », tandis que CHARREAU et NICOU (1971), NICOU et POULAIN (1982), en zone soudano-sahélienne (du Sénégal et du Burkina), pensent que le labour, bien conduit, est indispensable pour améliorer l'enracinement et intensifier la production. En 1987, NICOU *et al.*, étudiant les effets des techniques culturales d'économie de l'eau à la parcelle sur la production de céréales au Burkina, concluent « qu'il n'y a pas lieu de généraliser une technique culturale plutôt qu'une autre sur l'ensemble du territoire, car il faut s'adapter au contexte pédo-climatique ». Valable en zone semi-aride pour la conservation de l'eau, la technique du labour en zone soudanienne présente des avantages, des contraintes et des risques variés ; nous pensons donc qu'il faut étudier les différentes techniques en termes de complémentarité et non d'exclusion réciproque. LAL (1983) ne

conclut-il pas qu'il sera nécessaire, après un certain temps de pratique du « non-travail », de décompacter le sol par un labour profond ? L'art serait donc de détecter, dans chaque situation socio-économique et pédo-climatique, les combinaisons de techniques culturales qui assurent durablement une productivité élevée et qui ne dégradent pas l'environnement.

Nous aborderons ici le problème de l'évaluation des techniques culturales en fonction de leurs effets sur les risques de ruissellement et d'érosion des sols ainsi que sur la production de coton et de maïs sur un sol ferrugineux sableux fragile de la zone soudanienne du Cameroun. Nous avons comparé les techniques pratiquées dans la région à celles qui ont fait leurs preuves ailleurs, en vue d'améliorer les systèmes culturaux ou d'en créer de nouveaux, plus adaptés au contexte physique et socio-économique régional. Les mesures d'érosion ont été effectuées sur des parcelles de 100 à 1 000 m² et les résultats de deux campagnes sont analysés à l'aide du modèle « USLE » de WISCHMEIER et SMITH (1978).

LE MILIEU

La station expérimentale est située au village de Mbisiri (latitude : 8°23'N ; longitude : 14°33'E ; altitude : 380 m), à 40 km de Tcholliré, sur la route de Touboro, et à 250 km au sud-est de Garoua (fig. 1). Le climat est de type soudanien avec 1 000 à 1 500 mm de pluie tombant en sept mois, entre avril et octobre (fig. 2). Les courbes

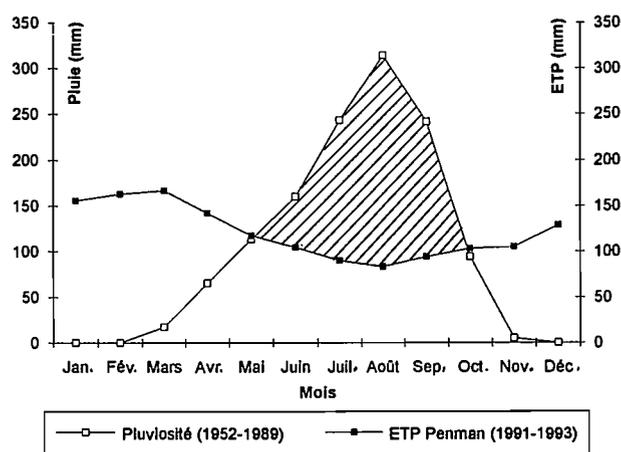


FIG. 2. — Pluie et évapotranspiration Penman (station de Touboro).
Rainfall and Penmann evapotranspiration (Touboro station).

« hauteur-intensité-durée » (fig. 3) permettent de conclure que, chaque année, il peut pleuvoir 75 mm en 24 heures, 55 mm en 1 heure et 37 mm en 30 minutes. La végétation naturelle est une savane arborée à *Isobertinia doka*, à strate herbacée dense dominée par *Hyparrhenia rufa*, *Pennisetum pedicellatum* et *Andropogon gayanus* (BRABANT et

GAVAUD, 1985). Dans les auréoles de parcours des cultures, la végétation passe à une savane arbustive à *Daniella olivieri*, *Terminalia*, *Commiphora africana*, *Combretum*, *Annona arenaria*, etc. La strate herbacée change peu, sauf dans les parcelles très dégradées où domine *Dactyloctenium aegyptiacum*.

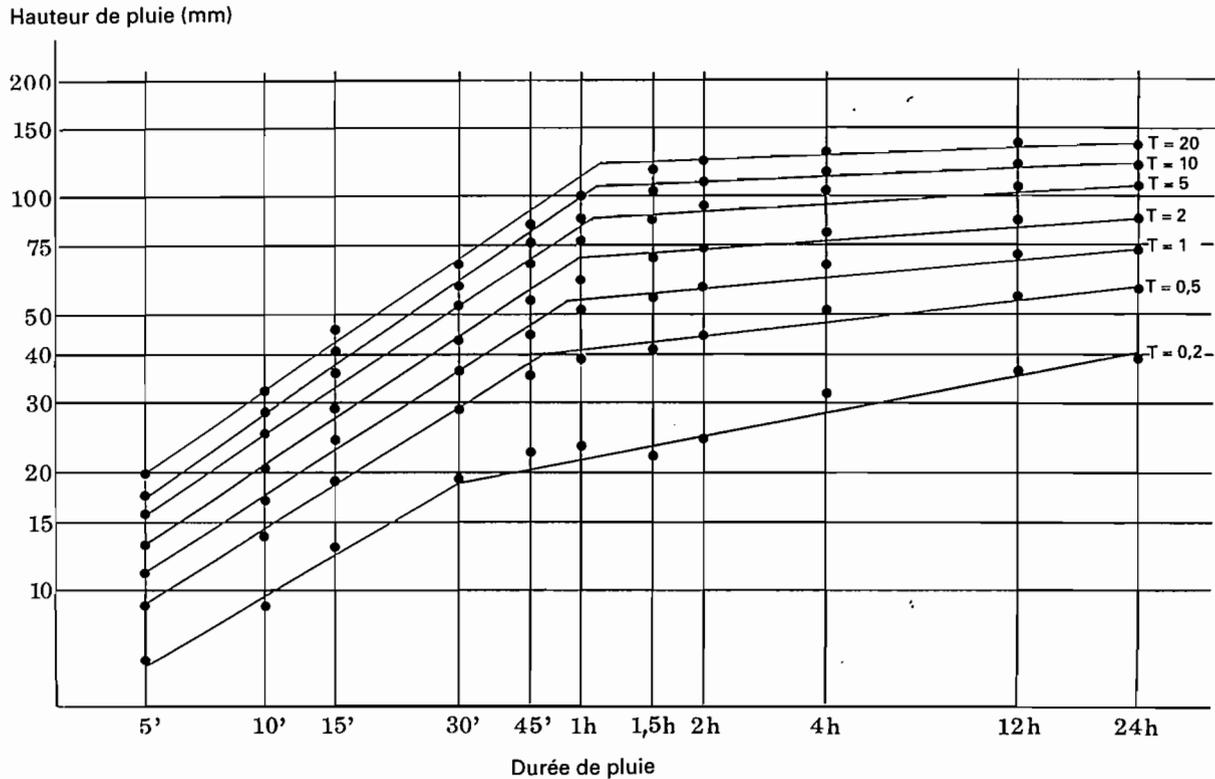


FIG. 3. — Courbes hauteur-intensité-durée-fréquence des pluies à Garoua (Cameroun) pour la période 1955-1971. D'après le CIEH. *Rainfall depth-intensity-duration-frequency curves at Garoua (Cameroon) for the 1955-1971 period. After CIEH.*

Le paysage est dominé par une butte témoin cuirassée à 400 m d'altitude, développée au piémont sud des monts Koum. Au sud, ce plateau résiduel est relié au Mayo-Rey (affluent de la Bénoué) par un long glacis de 5 km, à pente inférieure à 3 %, légèrement concave. Ce glacis est entaillé de ravines à pente plus raide (fig. 4).

La couverture pédologique (fig. 5), développée sur l'altérite d'un grès ferrugineux, est constituée de sols ferrugineux tropicaux indurés peu lessivés, très sableux (moins de 6 % d'argile kaolinique). L'épaisseur du sol meuble au-dessus de la carapace ferrugineuse augmente de quel-

ques centimètres au sommet de la butte résiduelle, à 130 cm au centre de la concavité. La carapace affleure 300 m après la zone de concavité, donnant lieu à une ligne de résurgence (ROOSE, 1991 a).

Avant défrichage, le sol est donc très sableux (sables grossiers dominants), peu acide, pauvre en matières organiques, à taux de minéralisation correct, à très faible capacité d'échange en cations essentiellement dépendante du taux de matières organiques (moins de 10 % d'argile) (tabl. I).

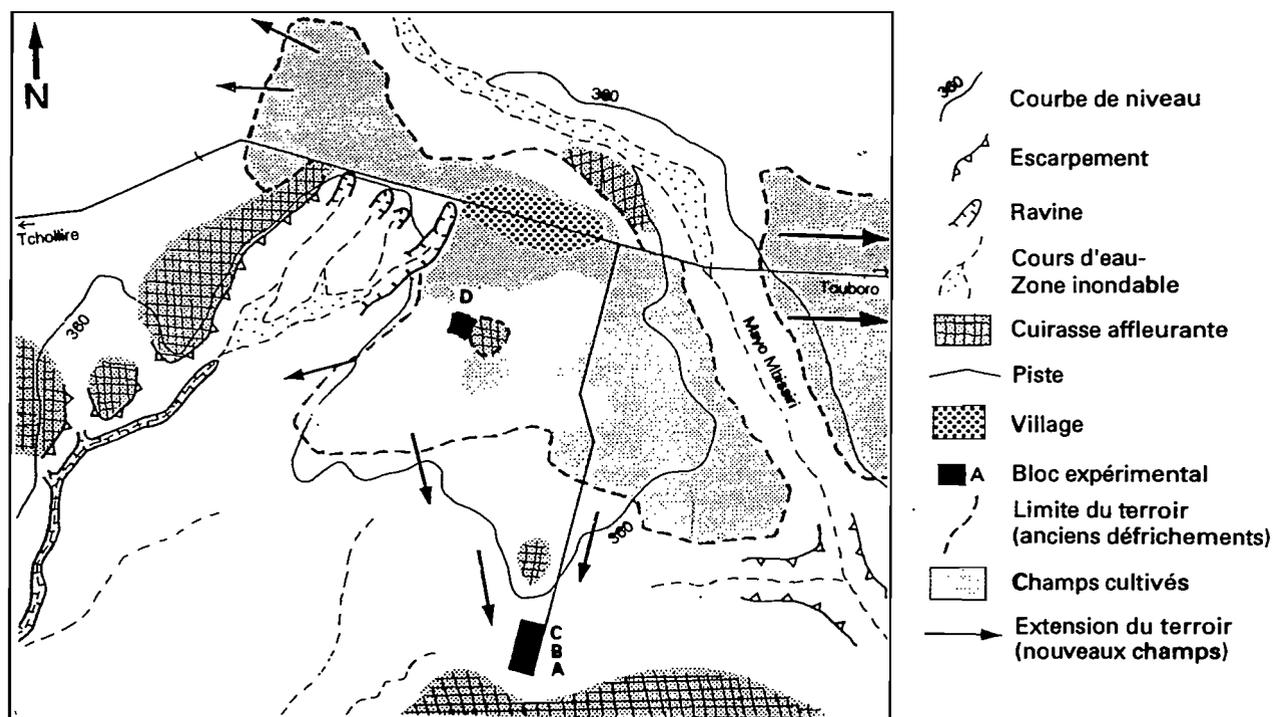


FIG. 4. — Carte géomorphologique du terroir de Mbissiri (1/30 000). D'après WAECHTER, 1993.
 Geomorphological map concerning Mbissiri area (1/30 000). After WAECHTER, 1993.

TABLEAU I
 Caractérisation des horizons de surface
 des blocs A, B et C avant défrichement
 Characterization of surface horizons
 in blocks A, B, and C before clearing

Horizon	0-20 cm	20-40 cm
Argile (%)	3 à 4	4 à 6
Limons (%)	13 à 16	13 à 18
Sables (%)	80 à 84	76 à 83
pH eau	6,2 à 6,5	6 à 6,4
Mat. organiques (%)	1,4 à 1,6	0,6
Azote total (%)	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2
Capacité échange de cations (méq/100 g)	2,3 à 3,2	1,9 à 3,3

LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La quantification des effets des techniques culturales a été réalisée sur 57 parcelles d'érosion classiques, composées d'un champ expérimental de 5 à 18 m de largeur, de 20 à 100 m de longueur, de 100 à 1 000 m² de surface, d'un canal collecteur retenant les sédiments grossiers, et de deux cuves de stockage des eaux et des suspensions fines reliées par un partiteur permettant d'évaluer 42 m³ de ruissellement (ROOSE, 1991 b).

La comparaison des bilans d'eau, des charges solides, ainsi que de la production de biomasse, est réalisée dans trois situations, sur deux toposéquences voisines :

- une savane arborée, dont le sol est en jachère depuis plus de trente ans (pente de 2 %) ;
- une jeune défriche cultivée depuis 1990 (blocs A, B et C, pentes de 1 %, 2 % et 2,5 %) ;
- une vieille défriche, dégradée et déclassée après trente ans de culture (bloc D, pente de 2,5 %).

Le dispositif comporte en outre six pluviomètres, deux pluviographes à augets à rotation journalière, un bac d'évaporation enterré et six lysimètres de sol reconstitué sur 0,5 à 0,9 m de profondeur.

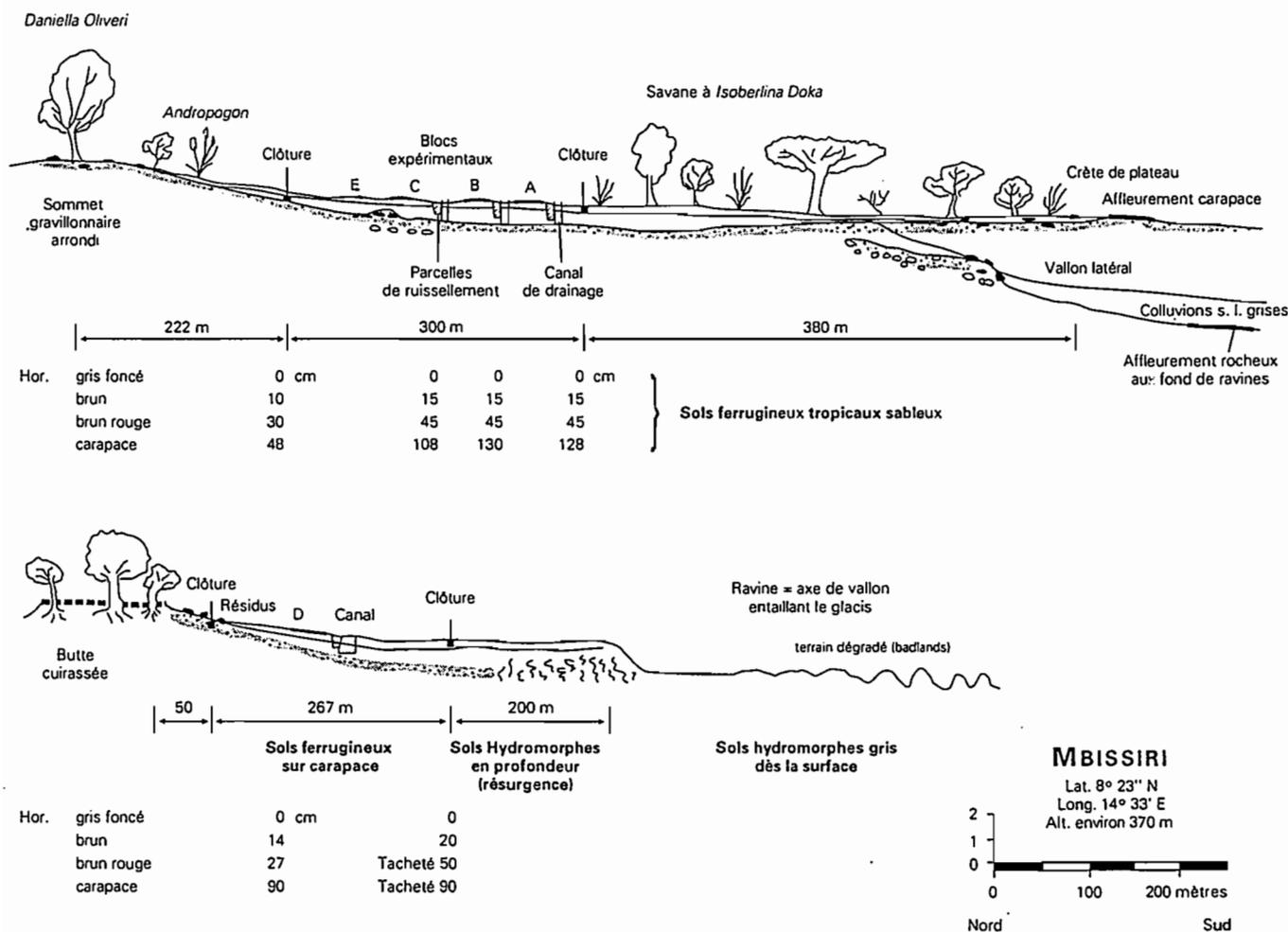


FIG. 5. — Toposéquences de Mbissiri (Nord-Cameroun).
Toposequences at Mbissiri (Northern Cameroon).

LES TRAITEMENTS

Les comparaisons concernent les traitements suivants :

- Savane arborée :
 - totalement protégée ;
 - brûlée précocement (un à deux mois après la dernière pluie utile) ;
 - brûlée précocement et pâturée (un mois après le retour des pluies).
- Témoin international : sol nu labouré une fois l'an et sarclé dans le sens de la pente ; il permet de calculer la résistance du « matériau sol » à l'érosivité des pluies.
- Témoin régional : labour mécanisé + NPKSB + urée, sarclage et buttage dans le sens de la pente, pour simuler les situations les plus difficiles et accélérer les processus de dégradation incriminés.

• Des variantes du témoin régional portant sur la densité et la gestion des matières organiques :

- résidus de culture enfouis en début de saison des pluies ;
- enfouissement de 3 t/ha/an de fumier de chèvre ou de terre de parc ;
- paillage d'herbes locales (*Andropogon*) après labour à raison de 5 t/ha/an (en humide) qui absorbe à la fois l'énergie des pluies et du ruissellement et qui apporte au sol des matières organiques stabilisantes ;
- ombrière en plastique tendue à 10 cm du sol qui n'absorbe que l'énergie des gouttes de pluies ;
- densité double de semis (40 cm x 25 cm au lieu de 80 cm x 25 cm).

- Travail réduit du sol + herbicides (Gramoxone + Round Up, 3 l/ha) :
 - travail à la houe réduit à l'ouverture du poquet pour enfouir les engrais (*no tillage*) ;
 - travail continu sur la ligne de semis aux dents ou à la pioche sur 10 à 15 cm (*minitillage*) ;
 - variantes : sarclage manuel ou chimique (peu de différence sur l'érosion).
- Restauration des sols dégradés (bloc D) :
 - labour profond + NPKSB ;
 - labour profond + NPKSB + biomasse de sorgho vigoureux ;
 - labour profond + NPKSB + résidus de culture enfouis ;
 - labour profond + NPKSB + fumier enfoui ;
 - deux années de jachère naturelle herbacée ;
 - deux années de jachère améliorée par le semis d'une légumineuse (*Calopogonium mucunoides*).
- Effet de la longueur de pente et de sa réduction par des « microbarrages perméables » :
 - 24 parcelles de 20 m et 8 de 40 m de longueur en blocs A, B et D ;
 - 6 parcelles de 60 m en bloc C et 2 parcelles de 100 m en bloc D ;
 - bandes enherbées de 1 m tous les 10 m ;

— haies vives de 2 m de largeur tous les 20 m (*Cassia siamea* + *Cajanus cajan* + herbes diverses).

Toutes les parcelles cultivées ont reçu la même fertilisation minérale. La rotation est bisannuelle et comprend le coton en 1991 (après un semis direct de maïs sur défriche manuelle en 1990) suivi d'un maïs en 1992. Le maïs reçoit en plus 5 kg/ha de sulfate de zinc. Le labour a été effectué avec une charrue à deux socs tirée par un tracteur de 80 ch, à l'exception des parcelles avec bandes d'arrêt ou haies vives qui ont été labourées aux bœufs. Le « *minitillage* » a été réalisé au cultivateur à dents rigides (7 à 10 cm).

En 1991, toutes les parcelles en travail minimal du bloc D ont été travaillées au cultivateur dans le but de décompacter le sol dégradé par plusieurs années de culture. L'outil s'est avéré mal adapté au sol compacté, car il n'a pas permis un bon enracinement du coton, ni du maïs qui l'a suivi. Sur les blocs A et B, une trop faible poussée des adventices n'a pas permis de disposer de suffisamment de biomasse pour protéger les parcelles en travail minimal. En revanche, des pailles de *Andropogon* et de *Pennisetum* ont servi au traitement « paillage sur labour » des blocs A, B et D.

Le tableau II donne d'autres éléments de la conduite de la culture.

TABLEAU II
Principaux éléments sur la conduite culturale des parcelles d'érosion de Mbissiri
Main elements concerning the cultural behaviour of runoff plots at Mbissiri

Traitement	1991	1992
Plante test	Cotonnier	Maïs
Labour	Charrue à socs tractée	Charrue à socs tractée
Date de labour Herbicide total + herbicide de pré-émergence	5/7 (D), 6/7 (A, B), 7/7 (C) Round Up et Gramoxone (4 l/ha)	18/6 (A, B, C, D) Round Up et Gramoxone Lasso à 6l/ha ou Atrazine
Date de semis	10/7 (D), 16/7 (A, B), 18/7 (C)	20/6 (D), 22/6 (A, B), 23/6 (C)
Densité normale	83 cm x 25 cm	83 cm x 25 cm
Densité double	41,5 cm x 25 cm	41,5 cm x 25 cm
Engrais	100 kg/ha NPKSBo (15, 20, 15, 6,1) + 50 kg/ha urée au semis et + 50 kg/ha urée 30 j après semis	Idem + 5 kg/ha de sulfate de zinc
Fumure organique	6 t/ha de terre de parc à bœufs après labour	3 t/ha de fèces séchées à l'air de caprins et ovins avant labour

RÉSULTATS

Les précipitations

Les précipitations pluviométriques des deux premières années à Mbissiri (1 174 et 1 513 mm) ont des hauteurs qui se situent de part et d'autre de la moyenne régionale sur 37 ans observée à Tcholliré, situé 45 km plus à l'ouest, et à Touboro, à 125 km au sud-est (tabl. III).

TABLEAU III

Pluviosité mensuelle à Mbissiri en 1991-1992 comparée aux moyennes mensuelles de Tcholliré (1952-1990) et de Touboro (1952-1989)
Monthly rainfall at Mbissiri in 1991-1992 as compared to the monthly means at Tcholliré (1952-1990) and at Touboro (1952-1989)

Mois	MBISSIRI		TOUBORO	TCHOLLIRE
	1991	1992	1952-1989	1952-1990
Mars	7	0	16,5	11,1
Avril	22	85,5	65,2	52,6
Mai	185	86,5	113,3	124,6
Juin	52	188,4	159,6	175,9
Juillet	387	255	242,8	269,8
Août	315	413,3	313,9	305,8
Septembre	144	316,5	240,7	214,6
Octobre	61,9	168	94,0	91,5
Novembre	-	-	5,1	2,9
	1 173,9	1 513,2	1 251,1	1 275,8

Les périodes dangereuses, les plus humides, se situent entre le 15 juin et le 15 septembre, selon les années. Des périodes déficitaires de deux à trois semaines sont fréquentes en juin et juillet. En ce qui concerne l'érosion, on observe de nombreuses pluies agressives de 60 à plus de 100 mm par jour chaque année. Mais les événements les plus érosifs paraissent liés à des séries d'averses entre mi-juin et mi-septembre.

En 1991, la campagne a démarré tardivement, entre le 10 et le 16 juillet : les pluies enregistrées durant le cycle cultural ont atteint 774 mm. En 1992, la campagne a démarré plus tôt (du 20 au 23 juin) et les précipitations durant le cycle ont atteint 1 184 mm.

Dans la zone soudanienne, avec une seule saison pluvieuse de sept mois, il est difficile de conduire deux cycles de culture pluviale sur la même parcelle. Cependant, la longueur de la saison des pluies permet le choix de la date de semis pour la plupart des espèces cultivées. La Sode-

coton conseille de semer tôt le cotonnier pour qu'il profite du pic de minéralisation et produise au maximum : malheureusement, le coton arrive à maturité quand les pluies sont encore importantes et les fibres peuvent être salées et déclassées. Le semis tardif donne une production moindre mais de meilleure qualité. Du point de vue de la conservation des sols, les semis retardés jusqu'au début de juillet permettent d'obtenir une production suffisante de biomasse, à partir des adventices ou des plantes de couverture, pour qu'elle puisse servir de paillage dans les systèmes de préparation conservatoire du sol.

Les effets catastrophiques des grosses averses et des séries de pluies en juillet-août qui sont à l'origine d'importants phénomènes de circulation de ruissellement et de terre pourraient être invoqués pour justifier les pratiques des paysans de la région, qui ont tendance à semer et à butter de préférence dans le sens de la pente. En effet, le buttage en courbe de niveau entraîne des ruptures de billons et la formation de ravineaux et de coulées de sable à l'occasion de ces gros orages. Il faut donc préciser les effets du billonnage en courbe de niveau avant d'engager les paysans à changer de pratique.

Le ruissellement (fig. 6 et 7)

En savane, sur 45 pluies de plus de 5 mm de hauteur, seulement 16 ont produit un ruissellement significatif sur la parcelle en défens tandis que 27 ont ruisselé sous savane brûlée et pâturée. Le ruissellement maximal varie de 3 à 10 % au terme d'une série de cinq pluies d'une hauteur cumulée de 160 mm. Le ruissellement annuel moyen dans le milieu naturel a varié entre 0,7 et 3 %.

En milieu cultivé, le ruissellement est très variable : le coefficient de ruissellement annuel moyen varie de 1 à 58 %, mais on peut regrouper l'ensemble des résultats en six familles de comportements :

— les parcelles labourées non protégées ruissellent plus que toutes les autres : le coefficient de ruissellement annuel moyen (K_{ram}) varie de 39 à 58 % et le ruissellement maximal (K_{rmax}) de 60 à 95 % des pluies journalières, selon que les parcelles sont cultivées ou dénudées ;

— les parcelles labourées protégées par un paillage ou par une ombrière ruissellent plus modérément ($K_{ram} = 17$ à 32 % ; $K_{rmax} = 45$ à 60 %) ;

— le billonnage cloisonné a contrôlé efficacement le ruissellement ($K_{ram} < 5$ %), y compris durant une pluie de 110 mm, sans qu'on observe de rupture de billon trop grave ;

— les parcelles cultivées sans labour sous paillis (*no tillage*) ont subi un très faible ruissellement ($K_{ram} < 10$ % ; $K_{rmax} = 30$ %) ;

— quant aux parcelles en jachère naturelle ou améliorée par une légumineuse, elles se comportent presque aussi bien que la savane ($K_{ram} < 4$ % ; $K_{rmax} < 12$ %) ;

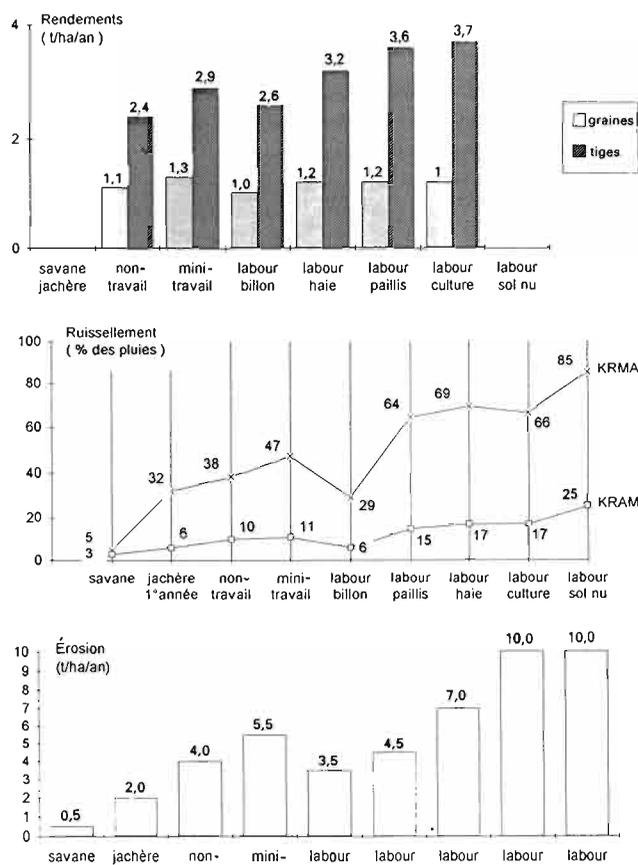


FIG. 6. — Synthèse de la campagne 1991 à Mbissiri des mesures de rendement en coton (t/ha), de ruissellement (Kram et Krmx en % des pluies) et de pertes en terre (sédiments en t/ha/an).
 Synthesis of the 1991 campaign at Mbissiri concerning the measurements of cotton yield (t/ha), runoff (Kram and Krmx % of rainfall) and soil losses (sediments in t/ha/year).

— les haies vives et les bandes enherbées semblent efficaces pour les averses modérées. Elles jouent un rôle de filtre pour les événements les plus importants (Kram = 10 à 20 % ; Krmx varie de 30 à 40 %).

On note que, sur les parcelles labourées, les ruissellements de 1991 n'atteignent que la moitié de ceux de 1992. Cela pourrait s'expliquer par une pluviosité plus importante en 1992 et une saturation du sol plus fréquente.

On a observé que les ruissellements sont les plus forts au bloc D car le sol est plus compact et moins profond au-dessus de la carapace ferrugineuse que dans les autres blocs.

L'efficacité du paillage sur les parcelles, travaillées ou non, est liée non seulement à l'interception de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et du ruissellement et à la rugosité de la surface du sol, mais aussi à la macroporosité créée par la mésosfaune du sol, notamment par les vers de terre : on a observé six à dix fois plus de turricules de

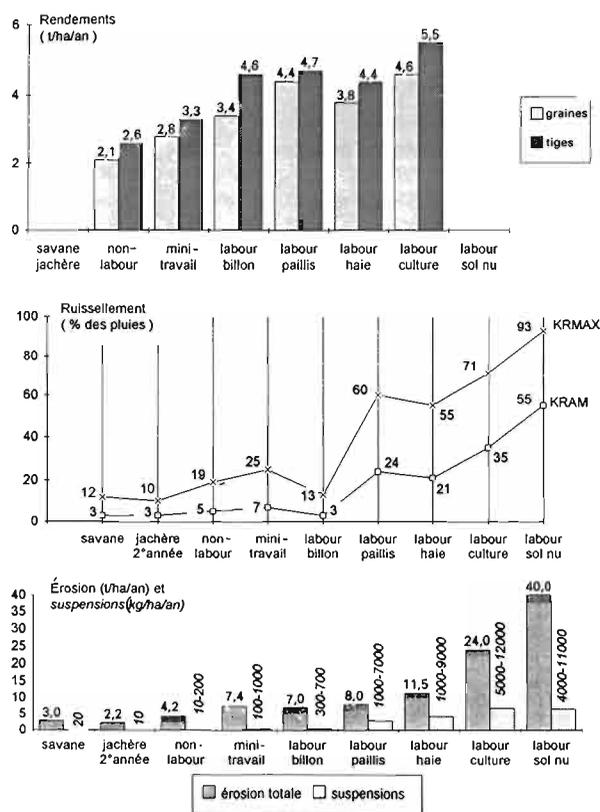


FIG. 7. — Synthèse de la campagne 1992 à Mbissiri des mesures de rendement en maïs grain et paille (t/ha/an), de ruissellement (Kram et Krmx en % des pluies) et de pertes totales en terre et suspensions (t/ha/an).
 Synthesis of the 1992 campaign at Mbissiri concerning the measurements of maize grain and straw yield (t/ha/year), of runoff (Kram and Krmx % of rainfall) and of total soil and suspension losses (t/ha/year).

vers de terre sur les parcelles couvertes de litière que sur celles qui sont labourées (fig. 8).

Sous ombrière, laquelle amortit l'énergie des gouttes de pluie, le ruissellement est loin d'être négligeable ; il semble que, sur ces sols sableux très fragiles, le tassement et la réorganisation de la surface du sol puissent se faire par simple humectation.

L'érosion (fig. 6 et 7)

Les pertes en terre varient de 1 à 50 t/ha/an selon la couverture végétale, les techniques culturales et la pente.

En savane, les pertes en terre ($E \leq t/ha/an$) sont plus élevées que celles observées par ROOSE (1980) en Afrique de l'Ouest. On peut évoquer trois raisons à cette différence : des pluies plus abondantes, une forte activité biologique et le piétinement de la zone dénudée voisine du canal lors de la construction du dispositif (projection directe dans le canal).

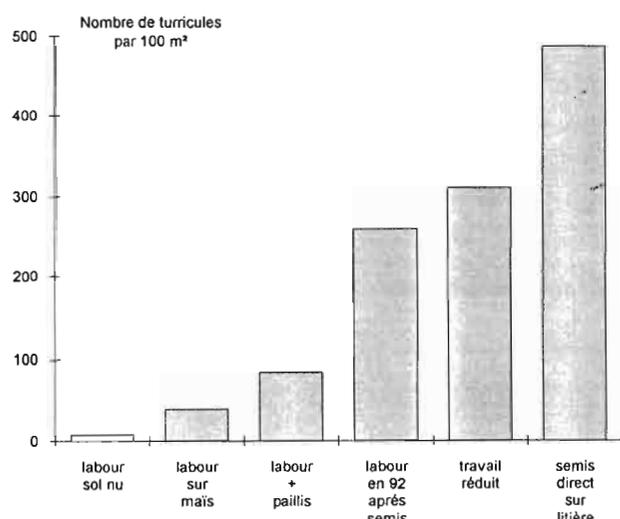


FIG. 8. — Nombre de turricules par 100 m² observé sur les parcelles d'érosion de Mbissiri le 2 août 1993.
Number of worm casts per 100 m² observed in runoff plots at Mbissiri on August 2nd, 1993.

EFFETS DU TRAVAIL DU SOL

Sous culture, les pertes en terre varient de 2 à 7 t/ha/an sur les parcelles non travaillées et de 5 à 27 t/ha/an sur les parcelles labourées.

Le tableau IV permet de comparer les pertes en terre sur les parcelles labourées et sur celles avec travail minimal ou nul. Il montre qu'on perd 1,5 à 10 fois plus de terre dans les parcelles labourées que dans celles qui sont paillées et non travaillées. Plus grave, les pertes en particules fines en suspension sont elles aussi nettement plus fortes sous labour (suspensions : 4 à 10 t/ha/an) que sur les parcelles couvertes par les résidus de culture et peu travaillées

(suspensions : 0,1 à 1 t/ha/an). On peut cependant réduire les pertes en terre de 40 à 75 % sur les parcelles labourées en les protégeant par l'épandage de 5 t/ha de litière.

L'épandage de paille sur un terrain labouré est un exemple de travail du sol conservatoire à condition que la biomasse couvre au moins 30 % de la surface du sol après le semis (DICKEY et SHELTON, 1987). Mais le problème est de récolter du paillage et de l'épandre sur un terrain labouré sans que cela entraîne des coûts prohibitifs. Or, dans la zone soudanienne, la longueur de la saison des pluies n'est pas un facteur limitant. Les observations dans le Sud-Est-Bénoué nous amènent à penser qu'il existe en milieu paysan des méthodes permettant de concilier un labour tardif et la présence d'adventices couvrant naturellement le sol pendant le début de la saison des pluies. Lorsque les adventices atteignent 20 à 30 cm de hauteur (mi-juin), les paysans font un labour qui n'enfouit pas totalement les herbes ; ils sèment ensuite sur les raies de labour. Après la levée, les paysans procèdent au premier désherbage qui consiste à arracher les adventices et à les étaler sur le sol entre les lignes de semis. Cette technique traditionnelle pourrait être perfectionnée afin d'obtenir à la fois les effets positifs du labour et du paillage. Une autre amélioration consisterait à tuer chimiquement les herbes par un herbicide de contact avant de réaliser le labour.

Le billonnage cloisonné avant le semis s'avère une technique intéressante du point de vue de la conservation de l'eau et du sol ($E = 0,1$ à $2,1$ t/ha/an dans le bloc C). Cependant, il exige beaucoup de travail lors de la préparation du sol et entraîne une réduction des rendements de 10 à 40 % car les pieds de cotonnier se déchaussent à mesure que les billons s'érodent. Cette méthode, très intéressante en zone plus sèche, ne nous paraît donc pas bien adaptée à la zone soudanienne.

TABLEAU IV
 Érosion (t/ha/an) en fonction
 de quatre modes de préparation du sol
Erosion (t/ha/year) as related to four types of soil tillage

Bloc		Labour Résidus exportés	Labour + paillage	Minitillage* Travail limité ligne	No tillage* Semis direct
A (100 m ²)	1991	9,2	2,2	6,7	6,3
	1992	8,9 + (4,8)	5,3 + (1,3)	4,6 + (0,1)	6,1 + (0,1)
B (100 m ²)	1991	8,2	5,7	6,8	6,7
	1992	16 + (4,6)	4,2 + (1)	13 + (0,3)	7,6 + (0,1)
C (1 080 m ²)	1991	5,1	-	-	0,5
	1992	14,9 + (5,8)	-	-	2,2 + (0,3)
D (100 m ²)	1991	20,1	5,6	2,9	3,0
	1992	27 + (10,6)	6,1 + (6,6)	3,5 + (1)	3,4 + (0,1)

* Les traitements en A et B avaient très peu de mulch.
 Les chiffres entre parenthèses indiquent les pertes en suspensions (en t/ha/an).

L'ÉRODIBILITÉ DU SOL

On ne dispose pas encore de toutes les données nécessaires au calcul précis de l'érodibilité du sol. En particulier, il nous manque l'indice d'érosivité des pluies, et la parcelle n'a pas encore trois années de culture. À titre indicatif, on peut cependant estimer les valeurs suivantes (ROOSE, 1977) :

$$K = \frac{E \text{ (t/ha/an)}}{R \times LS \times 2,24} \quad \text{où} \quad R = \frac{H \text{ pluies (mm)}}{2}$$

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2)$$

Les valeurs de l'indice K d'érodibilité ont été très faibles en 1991, première année de culture après défrichage (tabl. V).

Cela s'explique :

- par la mise en culture tardive et la faible agressivité climatique ;
- par la concavité des parcelles nues juste avant le canal de sédimentation ;
- par le rôle stabilisant du chevelu racinaire des graminées de la jachère précédente.

En 1992, les parcelles sont déjà beaucoup plus fragiles (K = 0,07 ; 0,18 ; 0,24) et on s'attend à des valeurs encore plus fortes pendant les deux cycles suivants.

TABLEAU V
Érodibilité des sols durant les deux premières campagnes
Soil erodibility during the first two campaigns

Bloc	Pente moyenne	1991	1992
A	1	0,09	0,07
B	2	0,06	0,24
D	2,5	0,07	0,18

Curieusement, l'érodibilité de la parcelle dégradée (bloc D) n'est pas supérieure à celle du bloc B de la jeune

défriche : cela pourrait s'expliquer par un labour profond qui a remonté en surface une terre plus argileuse et plus résistante dans le bloc D.

L'évolution des indices d'érodibilité ne dépend pas seulement de l'âge de la mise en culture des parcelles, mais aussi du degré d'intervention technique. Le labour motorisé, en supprimant dès la première année toute la charpente racinaire des ligneux et surtout des herbes annuelles, et en exerçant des pressions importantes sur le sol, produit en deux ans une dégradation du sol obtenue seulement après plusieurs années sur les parcelles ayant connu des interventions manuelles.

À Séfa, au Sénégal, sur un sol ferrugineux tropical lessivé, l'indice d'érodibilité est passé de 0,07 à 0,17 dès la deuxième année (ROOSE, 1967).

À Saria, au Burkina, sur un sol ferrugineux tropical lessivé plus riche en argile, l'indice d'érodibilité du sol a atteint les valeurs annuelles suivantes : 0,07 ; 0,17 ; 0,30 ; 0,25, etc.

Les ordres de grandeur sont donc très voisins pour ces trois sols ferrugineux sableux cultivés (ROOSE *et al.*, 1978).

EFFET DE LA GESTION DES MATIÈRES ORGANIQUES

On a comparé l'effet des matières organiques sous forme de résidus enfouis, de pailles déposées à la surface du sol (5 t/ha) et de fumier à raison de 3 t/ha/an.

On peut observer (tabl. VI) que le ruissellement et l'érosion sont du même ordre de grandeur, qu'il s'agisse de fumier ou de résidus enfouis. Au bout de deux ans, ces deux traitements n'ont guère amélioré la résistance du sol à la battance des pluies par rapport au témoin régional (labour sans résidus). En revanche, on a vu que le paillage réduit souvent le ruissellement et l'érosion à moins de 50 %. Cependant, en deuxième année, l'enfouissement de 3 t/ha/an de fumier de chèvre donne souvent les meilleurs rendements en maïs, d'autant plus élevés que l'érosion est faible sur la parcelle concernée (c'est-à-dire lorsque la fumure organique est conservée sur la parcelle).

TABLEAU VI
Ruissellement (Kram), érosion et rendements
Runoff (Kram), erosion and yields

Année	Ruissellement (Kram %)				Érosion (t/ha/an)				Rendement (t/ha/an)			
	Labour convent.	Lab.+ résidus enfouis	Labour + fumier	Labour + paille	Labour convent.	Lab. + rés. enfouis	Labour + fumier	Labour + paille	Labour convent.	Lab. + rés. enfouis	Labour + fumier	Labour + paille
1991 (coton)												
A	17,7	19,2	16,2	15,1	9,4	7,5	7,1	2,6	0,9	0,8	1,2	0,8
B	14,2	22,8	18,3	11,8	8,9	7,0	8,7	5,6	1,25	1,3	1,25	1,4
D	15,1	17,6	14,1	16,7	21,7	21,9	15,3	6,6	1,57	1,1	1,15	1,0
1992 (maïs)												
A	32,2	36,2	34,1	15,9	10,3	6,4	6,3	6,0	5,2	5,4	9,6	4,1
B	30,3	39,7	38,1	15,1	10,4	26,2	21,1	4,0	4,8	4,1	5,8	4,9
D	32,6	46,1	40,9	33,3	21,4	28,2	31,4	7,0	4,65	5,25	5,3	4,05

L'effet du fumier a été spectaculaire sur les rendements du maïs au bloc A (9,6 t/ha/an). Sur les autres blocs, les gains de rendement sont d'autant plus faibles que les pertes en terre sont fortes. Les améliorations du rendement provenant de l'apport de fumier de chèvre ne s'expliquent pas seulement par sa richesse en éléments fertilisants (3 % d'azote), mais aussi par l'amélioration de la structure et le stockage d'eau dans le sol.

EFFET DE LA LONGUEUR DE PENTE

D'après le modèle de WISCHMEIER et SMITH (1978), on doit s'attendre à une augmentation significative de l'érosion lorsque la pente passe de 20 à 40, 60 et 100 m de longueur. On peut observer (tabl. VII) que l'érosion n'augmente pas systématiquement avec la longueur de pente lorsque le sol est labouré et qu'elle a même tendance à régresser sur les parcelles soumises au semis direct dans la litière.

TABLEAU VII
Effet de la longueur de la pente, effet d'échelle et influence des haies
Effect of slope length, scale effect and influence of fences

Bloc	Pente (%)	Surface (m ²)	Longueur (m)	Érosion labour		Érosion no tillage		
				coton 1991	maïs 1992	coton 1991	maïs 1992	
A	1	100	5 x 20	9,2	8,9	6,3	6,1	
	1	200	5 x 40	6,1	4,6	3,9	3,3	
B	2	100	5 x 20	8,2	16,0	6,7	7,6	
	2	200	5 x 40	7,4	17,0	-	4,0	
C	2,5	1 080	18 x 60	5,1	14,9	0,5	2,2	
	+ haie vive	2,5	1 080	18 x 60	-	6,1	-	-
D	2,5	100	5 x 20	20,1	27,0	3,0	3,4	
	+ haie vive	2,5	500	5 x 100	-	21,0	-	-
	+ haie vive	2,5	1 000	10 x 100	-	-	-	2,3

EFFET DES HAIES VIVES

Dès la deuxième année, le cloisonnement des parcelles par des haies vives (ou des bandes enherbées) de 2 m de largeur tous les 20 m est aussi efficace que le paillage en ce qui concerne l'érosion ($E < 3$ t/ha/an dans les blocs A, B et C). Les bandes d'arrêt couvertes d'un tapis de litière ou de graminées retiennent surtout les sables : d'où la formation d'un petit talus. Ce n'est que lors des plus grosses averses que l'on constate encore des pertes significatives en eau et en suspensions fines au-delà des haies. Cependant, on observe souvent des mares temporaires en amont des haies vives. Le facteur C de Wischmeier varie de 0,17 à 0,41 pour des parcelles cultivées de 40 m de longueur, avec des haies arbustives tous les 20 m sur des pentes de moins de 2,5 %.

L'EFFET D'ÉCHELLE

Il est important de savoir à quel point les mesures effectuées sur des petites parcelles de 100 m² sont extrapolables aux champs paysans (1 000 à 2 500 m²). Pour ce faire, nous comparons dans le tableau VII les pertes en terre obtenues pour 100, 200 et 1 000 m² sur les blocs A, B et C (jeunes défriches) et sur le bloc D (vieille défriche).

On constate sur les parcelles labourées que l'érosion ne croît pas de façon systématique, tout au moins les deux

premières années. Sur les parcelles non travaillées avec litière, l'érosion a même tendance à diminuer lorsque la taille de la parcelle augmente ! Il y a probablement des interactions entre le système de culture (la stabilité et la rugosité de la surface du sol) et l'effet d'échelle. Par ailleurs, le ruissellement reste du même ordre de grandeur. Tant que la rugosité du sol due au labour et surtout à la litière empêche la vitesse de la nappe de ruissellement de s'accélérer, l'érosion ne peut croître avec la longueur de la pente, surtout sur ces pentes douces (1 à 2,5 %).

L'effet d'échelle est donc peu évident entre 100 et 1 000 m², mais il faut attendre confirmation de ces résultats pour les années suivantes et, de plus, rester prudent dans l'extrapolation des résultats de la parcelle expérimentale aux blocs de culture (100 ha) et aux bassins versants.

EFFET DU COUVERT VÉGÉTAL

Le couvert développé par les cultures de coton et de maïs réduit l'érosion des parcelles nues de 40 à 70 %. Le facteur C du modèle de WISCHMEIER et SMITH (1978) varie de 0,6 à 0,3 selon la vitesse de recouvrement du sol par la culture (et les adventices). Cela démontre la faiblesse du couvert végétal de ces cultures, tout au moins durant les deux premiers mois de leur croissance.

Les parcelles couvertes de paillis et d'ombrière se comportent de façon très comparable. L'érosion est donc dépendante non seulement de l'énergie de la battance des pluies mais aussi de l'énergie du ruissellement, non négligeable au cours des pluies importantes. En l'absence de l'impact des gouttes de pluie sur les mottes (sous ombrière), la réduction de la rugosité initiale du sol est plus lente. La dégradation des mottes est alors due à la simple humectation de ces sols sableux ainsi qu'au frottement de la lame ruisselée entre les mottes.

La production végétale

Le tableau VIII montre que les rendements en coton graine, en 1991, et en maïs grain, en 1992, sont bien supérieurs (10 à 40 %) sur labour que sur non-labour avec paillage. Les rendements sur parcelles non labourées et non dégradées sont égaux ou supérieurs à ceux des parcelles labourées quand la litière est peu abondante (ex. : blocs A et B, en 1991, coton).

TABLEAU VIII
Rendements comparés (q/ha) en coton graine et maïs grain des parcelles d'érosion sur labour et semis direct sous litière (Mbissiri, 1991-1992)
Compared yields (hundredweights/ha) in cottonseed and grain maize observed in runoff plots on ploughing and direct drilling under litter (Mbissiri, 1991-1992)

Année	Traitement	BLOC			
		A	B	C	D
1991 (coton)	Labour	8,5	12,6	12,4	13,5
	Semis direct*	14,2*	14,8*	8,2	5,0
1992 (maïs)	Labour	51,3	49,2	38,0	50,6
	Semis direct*	24,6*	26,3*	18,0	10,6

*paillage insuffisant sur les blocs A et B.

En 1991, la faible productivité des parcelles non travaillées semble due partiellement à la présence d'un épais paillage de *Andropogon* sur le bloc C et de *Dactyloctenium* sur le bloc D, contrairement aux blocs A et B peu paillés. Sous paillage, on note un jaunissement des plants de coton qui traduit une faim d'azote au terme du premier mois après le semis. On observe ensuite une faible croissance végétative. La faim d'azote est souvent expliquée par l'immobilisation microbienne de cet élément en présence d'une biomasse biodégradable. Cependant, il est aussi possible que l'augmentation de l'infiltration sur la parcelle couverte de paillis entraîne une augmentation des pertes d'azote dans les eaux de drainage ou encore crée des conditions d'engorgement, de lixiviation et de dénitrification. Ce jaunissement des plants fut aussi observé sur la parcelle labourée et paillée du bloc D. La baisse de rendement dans ce cas semble être liée à la répartition des pluies, à l'espèce végétale cultivée, à la quantité de paillis et au tassement du sol.

Sur le bloc D, l'observation des profils racinaires du maïs a montré que la principale contrainte à la productivité sur les parcelles non travaillées est la compacité du sol qui entraîne un mauvais enracinement (fig. 9). La productivité du sol est avant tout fonction des caractéristiques qui affectent le développement du système racinaire des cultures. Le tableau VIII montre que, après décompaction du sol, le potentiel de productivité du bloc D (dit dégradé) reste équivalent à celui de la nouvelle défriche. La dégradation physique superficielle du sol n'est pas synonyme de dégradation de son potentiel de productivité. Elle traduit une forte instabilité à l'eau des agrégats et une faible résistance à la battance. Cet état devient une contrainte à la production végétale lorsqu'il est associé aux facteurs qui favorisent une érosion intolérable.

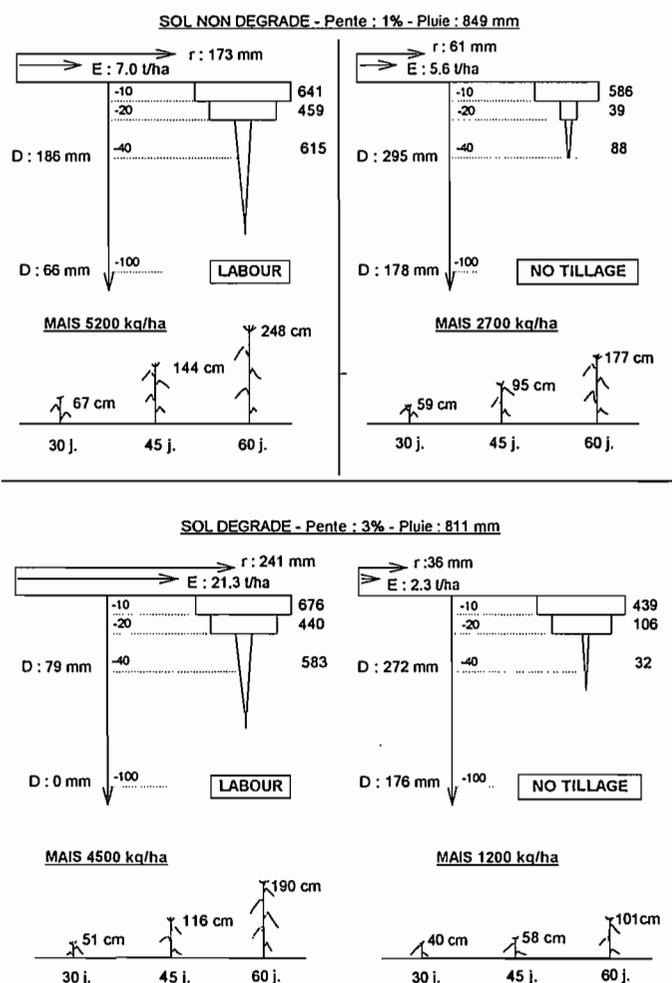


FIG. 9. — Bilan hydrique, rendements, enracinement et érosion. Comparaison du système labour conventionnel et du semis direct sur les blocs « dégradés » (D) et « non dégradés » (A) à Mbissiri. D'après SANON, 1992.
Water balance, yields, rooting and erosion. Comparison between the conventional ploughing system and direct drilling in « degraded » (D) and « non degraded » (A) blocks. Mbissiri. After SANON, 1992.

La productivité végétale varie en fonction du sol ; les blocs A, B et C sont installés sur la même toposéquence, mais les rendements diminuent à mesure que l'épaisseur de l'horizon meuble se réduit. Elle est fonction des capacités de stockage du sol en eau et en nutriments.

ÉVOLUTION DU PH ET DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL

En février 1991, 48 échantillons de sol (0-10 cm) ont été prélevés pour caractériser l'hétérogénéité de sa fertilité en fonction de son histoire (tabl. IX).

Les taux de matière organique et d'azote sont très faibles (C/N = 10) sur ces sols ferrugineux tropicaux très sableux, peu acides. La vieille jachère, brûlée et pâturée régulièrement depuis plus de trente ans, a peu amélioré la situation : il ne faut donc pas trop compter sur la jachère naturelle courte pour régénérer la fertilité des sols dégradés (ROOSE, 1993). Le fumier accumulé sur les lieux de parcage de nuit du bétail a amélioré l'état du sol : la production de maïs de 1990 y est bien meilleure qu'ailleurs. Cependant, c'est la mésafaune (les vers de terre et les termites du genre *Trinervitermes*) qui concentre les matières organiques à la surface du sol. La faune a donc un rôle important à jouer dans le bilan des matières organiques.

TABLEAU IX

Variabilité du pH et des teneurs en carbone et azote des dix premiers centimètres du sol en février 1991 à Mbissiri
Variability of pH and carbon and nitrogen contents in the first ten centimeters of soil in February 1991 at Mbissiri

	% Matière organique	N	pH eau	pH KCl
Termitières de <i>Trinervitermes</i>	1,9	0,12	6,6	5,9
Turricules frais de vers de terre	1,8	0,06	7,0	6,3
Ancien parc de nuit des animaux	1,6	0,08	6,9	6,0
Vieille jachère de plus de 30 ans	1,2	0,06	7 à 6	6,3 à 5,3
Jeune défriche de 2 ans	1,1 à 0,5	0,05	6,9 à 5,7	5,9 à 4,7
Vieille défriche cultivée > 30 ans	0,5 à 0,4	0,01	6,6 à 5,3	5,7 à 4,3

CONCLUSION

Dans la zone soudanienne observée, les événements pluvieux les plus décisifs pour la conservation de l'eau et de la fertilité des sols sont des séries de pluies et des averses de plus de 60 mm par jour qui peuvent tomber lors de chacun des mois de juin, juillet, août et septembre. L'agressivité des pluies est particulièrement dangereuse en juin et juillet lorsque les sols ne sont pas encore couverts par les cultures.

Les sols ferrugineux sableux de cette zone sont très fragiles, à la fois vis-à-vis de l'agressivité des pluies, de l'énergie du ruissellement et de certaines techniques culturales qui dénudent les sols, appauvrissent l'horizon cultivé en biomasse et en argile et, enfin, accélèrent leur dégradation physique par la battance, la minéralisation des matières organiques humifiées, l'humectation et le tassement.

Sous savane soudanienne, les pertes en eau, en suspensions fertiles et en terre sableuse sont très réduites. En milieu cultivé, ces pertes dépendent des techniques culturales. Celles qui maintiennent une litière sur le sol favorisent l'infiltration et la lixiviation, mais réduisent l'érosion. Par contre, le labour classique expose le sol à la battance des gouttes de pluie, provoque un ruissellement abondant sur la surface encroûtée du sol et une érosion si grave qu'elle risque d'entraîner à moyen terme une baisse significative de la productivité des terres. La dégradation

physique dépasserait certains seuils au-delà de douze à quinze ans.

Durant les deux premières années, le labour conventionnel a donné les meilleurs rendements tandis que le travail réduit du sol a favorisé l'infiltration et réduit l'érosion. Il nous faut donc contrôler l'un et l'autre, soit en améliorant le travail du sol sur la ligne de plantation, soit en couvrant le labour (paillis ou plantes de couverture), soit encore en cloisonnant la pente par des « microbarrages perméables » tous les vingt mètres. Le billonnage cloisonné ne semble pas une bonne solution pour ces zones très humides à cause du déchaussement des plantules.

La dégradation du sol pour un agronome est essentiellement d'ordre économique : lorsque les intrants ne sont plus remboursés par un rendement suffisant, la parcelle est déclassée.

Pour le pédologue, la dégradation physique du sol se manifeste par sa fragilité à la battance et par la formation d'horizons peu perméables, tassés en surface ou au fond du labour. Cette dégradation physique ne réduit la productivité végétale que lorsque sont réunies les autres conditions de développement d'une érosion dangereuse (pente trop longue ou trop forte, surface du sol dénudée et fragilisée, pluies érosives, etc.).

Durant les deux années d'observation, les matières organiques enfouies sous forme de résidus de récolte ou de fumier ne semblent pas avoir eu d'effet significatif sur le

contrôle du ruissellement et de l'érosion, contrairement aux résidus organiques laissés en surface. En revanche, l'apport d'une faible dose de fumier (3 t/ha/an) améliore les rendements des parcelles protégées de l'érosion.

À la suite de ces deux années d'observation, il faut rester prudent pour proposer des améliorations au système. Il nous semble cependant possible de suggérer les orientations suivantes :

— améliorer le travail du sol réduit à la ligne de culture, y introduire une fumure organique localisée et répartir la fumure minérale en fonction des besoins des cultures et des risques de drainage ;

— introduire sous le maïs une jachère courte de légumineuses (*Calopogonium mucunoides* ou *Stylosanthes ha-*

mata) (KLEIN, 1994), laquelle fournira une litière morte pour la culture cotonnière suivante (alternance labour et semis direct) ;

— retarder le labour pour favoriser la production d'une biomasse qui pourrait servir de paillis sur la parcelle ;

— introduire tous les vingt mètres une bande d'arrêt paillée fourragère, soit enherbée, soit arbustive ; entre les talus qui se forment progressivement, la pente des terres cultivées en courbe de niveau s'adoucirait au fil du temps et les risques d'érosion s'atténueraient.

La méthode des parcelles d'érosion paraît être un bon outil d'évaluation du fonctionnement des différents systèmes de sols naturels ou cultivés, à travers l'étude de l'érosion ainsi que des bilans hydrique, chimique et biologique.

BIBLIOGRAPHIE

- BOLI (Z.), BEP (B.), ROOSE (E.), 1991 — Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord-Cameroun. *Bull. Réseau Érosion*, 11 : 127 - 138.
- BRABANT (P.), GAVAUD (M.), 1985 — *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun*. Paris, Orstom, Yaoundé, Mesires-Ira, 285 p.
- CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971 — L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche africaine et les incidences agronomiques. *Agron. Trop.*, 26 (9) : 903- 978 et 26 (11) : 1183-1247.
- DICKEY (E. C.), SHELTON (D. P.), 1987 — « Targeted educational programs to enhance the adoption of conservation practices ». In : *Optimum erosion control at least cost*. Proc. nat. symposium on conservation systems, ASAE, Publication 08-87.
- KLEIN (H. D.), 1994 — Introduction de légumineuses dans un système coton-céréales au Nord-Cameroun. *Bull. Réseau Érosion*, 14 : 393-398.
- LAFLEN (J. M.) *et al.*, 1987 — « Yields conservation and cost of tillage systems in Illinois ». In : *Optimum erosion control at least cost*. Proc. nat. symposium on conservation systems, ASAE, Publication 08-87.
- LAL (R.), 1983 — *No-till farming. Soil and water conservation and management in the humid and sub-humid tropics*. Ibadan, IITA, Monograph n° 2, 64 p.
- NICOU (R.), POULAIN (J.-F.), 1982 — Les effets agronomiques du travail du sol en zone tropicale sèche. *Machinisme Agricole Tropical*, 37, 7 p.
- NICOU (R.), OUATTARA (B.), SOME (L.), 1987 — *Effet des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières au Burkina Faso*. Ouagadougou, Inera, 77 p.
- ROOSE (E.), 1967 — Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Trop.*, 22 (2) : 123-152.
- ROOSE (E.), 1977 — *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 78, 108 p.
- ROOSE (E.), 1981 — *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 130, 569 p.
- ROOSE (E.), 1991 a — *Protocole standard pour les parcelles de mesure de l'érosion en nappe et rigole, en accord avec le modèle « USLE » de Wischmeier et Smith. Adaptation pour la station de Mbissiri*. Montpellier, Orstom, 11 p.
- ROOSE (E.), 1991 b — *Compte rendu de la troisième mission Roose au Nord-Cameroun*. Montpellier, Orstom, 7 p.
- ROOSE (E.), 1993 — « Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale ». In : *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires, 494 p.
- ROOSE (E.), ARRIVETS (J.), POULAIN (J.-F.), 1978 — *Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés issus de granite sous sorgho et sous une savane soudano-sahélienne : Saria (Burkina Faso), campagne 1971 à 1974*. Paris, Orstom, 123 p.
- SANON (K.), 1992 — *Étude du bilan hydrique en fonction des techniques culturales dans un système de culture intensif (coton-maïs) sur sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun*. Mémoire DAT, Cnearc/Esat, Ira, Montpellier, 56 p.
- SOME (L.), 1989 — *Diagnostic agro-pédologique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Étude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, mil et maïs*. Thèse, USTL, Montpellier, 270 p.
- WAECHTER (F.), 1993 — *Comportement hydrique d'un sol ferrugineux sableux sous rotation coton-maïs à Mbissiri (Nord-Cameroun)*. Mémoire DESS, univ. Paris-XII, Ira, Cيراد, Orstom, 54 p.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1978 — *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Washington, USDA, Handbook n° 537, 58 p.

L'agroforesterie et la GCES au Rwanda

Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ?

Éric ROOSE (1), François NDAYIZIGIYE (2) et Léonard SEKAYANGE (3)

(1) Centre Orstom, BP 5045, Montpellier cedex 1, France.

(2), (3) Station ISAR de Rubona, BP 138, Butare, Rwanda.

RÉSUMÉ

Le Rwanda connaît depuis une cinquantaine d'années une phase active d'érosion parce que la pression démographique pousse les paysans à cultiver des pentes toujours plus raides et plus hautes, des sols épuisés et fragilisés. De nombreux projets ont tenté de lutter contre l'érosion : leur succès est de courte durée car les processus d'érosion sont multiples, le référentiel technique n'est pas au point, les conditions écologiques sont très variées (altitude de 800 à plus de 3 000 m) et les implications foncières, sociologiques, politiques et économiques sont complexes.

Les résultats de la recherche sur de nombreuses parcelles confirment les risques graves de décapage (1 à 3 cm par an) des horizons humifères (par l'érosion en nappe et en rigole et par le travail du sol) sur les pentes raides (20 à 60 %) des collines cultivées. Cependant, les recherches suggèrent quatre solutions pour stabiliser les versants : le paillage, les haies vives alternant avec de gros billons couverts en permanence, les terrasses radicales (risques de glissement) et la végétalisation permanente (forêt avec sous-bois, prairie ou verger avec plantes de couverture). Mais la « conservation des sols » pour elle-même ne satisfait pas les paysans car elle n'augmente pas la productivité de la terre ni du travail.

Une nouvelle série d'essais a été mise en place pour vérifier s'il est possible non seulement de stabiliser le sol et la production, mais encore d'améliorer sensiblement celle-ci avec les amendements organiques disponibles sur place. Les résultats confirment que la culture entre des haies d'arbustes permet de maîtriser le ruissellement ($K_{ram} < 2\%$ mais $K_{rmax} = 35\%$ en cas d'orage sur sol humide) et l'érosion ($E < 2$ t/ha/an au bout de deux ans). Les haies produisent 3 à 9 t/ha/an de biomasse fourragère et 2 à 4 t/ha/an de petit bois, matière organique qui jointe aux résidus de culture forme une biomasse équivalente à la litière déposée par la forêt naturelle. Cette biomasse mobilise 80 à 120 kg/ha/an d'azote, 2 à 12 kg de phosphore (sol très carencé) et 20 à 80 kg de K, Ca et Mg selon la richesse du sol. Cet apport minéral s'avère insuffisant pour restaurer la fertilité des sols ferrallitiques très acides : malgré un apport complémentaire de 10 t/ha de fumier de parc, les rendements des cultures n'ont guère progressé.

Pour obtenir des rendements intéressants (23 q/ha de maïs plus haricot et 15 q/ha de sorgho par an), il a fallu chauler le sol acide (2 à 3 t/ha de chaux tous les trois ans), fumer le sol (3 à 10 t/ha tous les deux ans de fumier plus les émondes des haies) et nourrir les plantes cultivées (N de 40 à 100 kg/ha ; P_2O_5 , de 30 à 100 kg/ha ; K_2O , de 20 à 200 kg/ha en fonction des exigences des plantes et des carences du sol). L'agroforesterie peut donc aider à stabiliser le milieu, mais un complément minéral reste indispensable si l'on veut restaurer un niveau acceptable de productivité du sol et du travail, argument nécessaire pour faire accepter l'effort de protection du milieu rural par les paysans.

MOTS CLÉS : Rwanda — Agroforesterie — Haie vive — Érosion — Ruissellement — Restauration de la productivité des sols — Remontée biologique — GCES — Fertilisation minérale.

ABSTRACT

AGROFORESTRY AND LAND HUSBANDRY IN RWANDA.

HOW TO RESTORE THE ACID SOILS PRODUCTIVITY IN TROPICAL MOUNTAINS DENSELY POPULATED?

Presently Rwanda has many erosion problems with high demographic pressure which forces farmers to crop on very steep and fragile slopes (slumping risks). Soil conservation programs are numerous but seldom successful because erosion processes are different with ecological situations, unsatisfactory technical approaches and socio-economic and complex land property implications.

Runoff plots data on several plots confirmed heavy risks of sheet, rill and tillage erosion (1 to 3 cm/year) on steep cultivated slopes (20 up to 60 %). Nevertheless researches suggested four solutions to stabilize the hillslopes : mulching, living hedges with leguminous bushes, bench terracing and permanent greencover like forest, pasture or orchard with permanent grass. But conventional soil conservation does not satisfy farmers because it does not increase ground and labour productivity.

A new serie of trials was proposed to verify the efficiency of agroforestry not only to stabilise the hillslope production but also to increase significantly the soil productivity with local organic manure. Results confirmed the agroforestry aptitude to control runoff and erosion ($E < 2$ t/ha/year). After 2 years, hedges produced 2 to 9 t/ha/year of green forage and 2 to 4 t/ha/year of fuel wood: joined with crops residues, this biomass, as important as the litter deposits by the forests, brought on the topsoil 80 to 120 kg/ha/year of N, 2 to 12 kg of P_2O_5 and 20 to 80 kg of K_2O , CaO and MgO, depending on bush species and soil fertility. This mineral fertilisation was unable to restore initial soil fertility: even with 10 t/ha/year manure more, the production level remained very low (600 kg of maize and beans and 800 kg/ha/year of sorghum grains).

To get interesting production (2,300 kg of corn and beans grains and 1,500 kg/ha/year of sorghum) it was necessary to correct the pH (3 t/ha/3years of lime), 3 to 10 t/ha/2years of manure and mineral complement to feed crops (N, 40 to 100 kg, P_2O_5 , 30 to 80 kg and K_2O , 20 to 200 kg/ha depending on plants needs and soil deficiencies). Agroforestry can stabilise hillslopes and yields but substantial mineral complement is necessary to obtain an important improvement of the ground and labour productivity.

KEYWORDS : Rwanda — Agroforestry — Living hedge — Erosion — Runoff — Soil productivity restoration — Biomass production — Organic manure — Mineral fertilisation.

RESUMEN

AGROFORESTERÍA Y LA GESTIÓN DEL AGUA, DE LA BIOMASA Y DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS (GCES) EN RWANDA (CENTRAL AFRICA). COMO RESTAURAR LA PRODUCTIVIDAD DE LAS TIERRAS ÁCIDAS EN LAS MONTAÑAS TROPICALES CON FUERTE DENSIDAD DE POBLACIÓN ?

En Rwanda se conoce desde hace unos 50 años una fase activa de erosión porque la presión demográfica empuja a los campesinos a cultivar vertientes siempre más fuertes y altas con suelos pobres y frágiles. Numerosos proyectos intentaron luchar contra la erosión : sus éxitos fueron de corto plazo porque los procesos de erosión son múltiples, las técnicas poco adaptadas, las condiciones ecológicas muy variadas (altitud de 800 a > 3 000 m) y las tenencias de la tierra así como las implicaciones sociológicas, políticas y económicas son complejas.

Los resultados de las investigaciones sobre numerosas parcelas confirman los riesgos importantes de erosión laminar, en surcos o por el trabajo del suelo de los horizontes húmicos (3 cm/año) sobre las pendientes fuertes (20 a 60 %) de las colinas con cultivos. Sin embargo, las investigaciones proponen 4 tipos de soluciones para estabilizar las vertientes : el barbecho, las barreras vivas alternando con lomos grandes siempre bien cubiertos, las terrazas radicales (riesgos de deslizamiento) y el mantenimiento de la vegetación (selva con bosques secundarios, arboricultura con plantas de cobertura). Pero la « conservación de los suelos » concebida de esta manera no convence siempre a los campesinos porque no aumenta la productividad de la tierra y del trabajo.

Una nueva serie de ensayos fue lanzada para verificar si es posible no solamente estabilizar el suelo y la producción sino también para mejorarla con el uso de abonos orgánicos disponibles en el sitio. Los resultados confirman que el cultivo entre barreras de arbustos permite controlar el escurrimiento ($K_{ram} < 2$ % pero K_{max} de 35 % en el caso de aguaceros sobre un suelo húmedo) y la erosión ($E < 2$ t/ha/año después de 2 años). Las barreras producen de 3 a 9 t/ha/año de biomasa forajera y de 2 a 4 t/ha/año de leña pequeña, materia orgánica cuyos efectos se juntan a los de los residuos de cultivos para formar una biomasa equivalente a la capa vegetal producida por la selva natural.

Esta biomasa moviliza de 80 a 120 kg de N, de 2 a 12 kg de P y de 20 a 80 kg de K, Ca y Mg según la riqueza del suelo. Este aporte mineral no fue suficiente para restaurar la fertilidad de los suelos ferralíticos muy ácidos : a pesar de un aporte complementario de 10 t/ha de abono orgánico, los rendimientos no progresaron mucho.

Para obtener rendimientos interesantes (23 quintales de maïs + frijoles, y 15 quintales de sorgho por año), fue necesario añadir cal (2 a 3 t/ha/año), poner más abono (3 a 10 t/ha/2 años) y alimentar las plantas cultivadas (N de 40 a 100 kg, P₂O₅ de 30 a 100 kg; K₂O de 20 a 200 kg/ha en función de las demandas de las plantas y de las deficiencias del suelo). La agroforestería puede ayudar para estabilizar el medio pero un complemento mineral es indispensable si se quiere restaurar un nivel aceptable de productividad del suelo y del trabajo, argumento indispensable para hacer aceptar a los campesinos el esfuerzo que necesita la protección del medio.

PALABRAS CLAVES : Rwanda — Agroforestería — Barreras vivas — Erosión — Escurrimiento — Restauración de la productividad de los suelos — GCES — Materia orgánica — Fertilización mineral.

INTRODUCTION

Le Rwanda est un petit pays (26 000 km²) montagneux (altitude : 900 à 4 200 m), isolé en Afrique centrale à plus de 1 000 km de l'océan Indien et 2 000 km de l'océan Atlantique. « Pays aux mille collines », le Rwanda pré-

sente des paysages très variés. On y distingue six zones bioclimatiques principales en fonction du soubassement géologique et des formes de paysage, de la densité de population, des cultures et surtout des précipitations qui augmentent avec l'altitude (DELEPIERRE, 1982) (fig. 1).

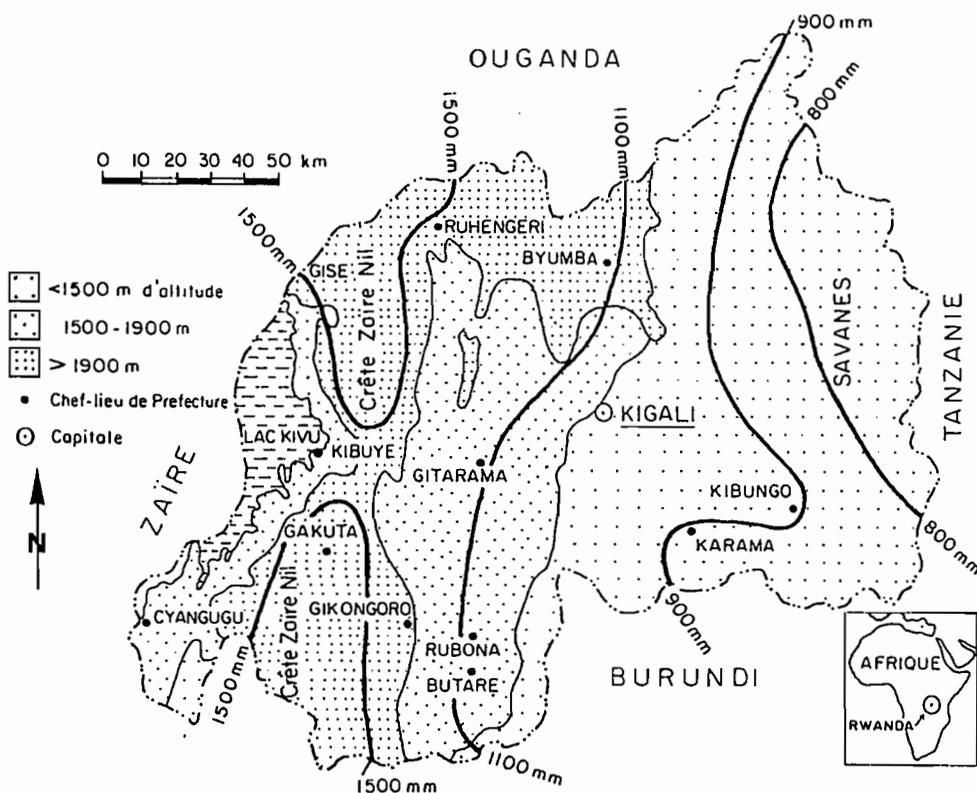


FIG. 1. — Carte des zones agroécologiques du Rwanda en fonction de l'altitude (< 1 500 m, < 1 900 m, > 1 900 m) et des précipitations (< 900 mm, < 1 500 mm, > 1 500 mm). D'après DELEPIERRE, 1982.

Map of agro-ecological areas of Rwanda in relation to altitude (< 1 500 m, < 1 900 m, > 1 900 m) and rainfall precipitations (< 900 mm, < 1 500 mm, > 1 500 mm). After DELEPIERRE, 1982.

Ce pays a connu récemment une très forte croissance démographique : la population du Rwanda était estimée à un million d'habitants au début du siècle, deux millions en 1920, 2,6 millions en 1962 (après deux famines), plus de sept millions en 1992 et sans les événements elle aurait dépassé les dix millions vers l'an 2000. Le taux de croissance est l'un des plus élevés du monde (3,2 %) : la population double en vingt ans (SIRVEN *et al.*, 1974 ; GUI-CHAOUA, 1989). La croissance économique ne peut plus suivre la croissance démographique : la population paysanne a dépassé les limites de la pauvreté. Comme ce pays n'a presque plus de réserve foncière, la taille moyenne des exploitations diminue dangereusement : en 1993, elle était inférieure à 0,8 ha et plus de 25 % des familles devaient survivre sur moins de 0,4 ha.

Jadis, trois communautés vivaient dans ces paysages tropicaux d'altitude : les artisans (3 %), les agriculteurs (82 %) et les éleveurs (15 %). Mais les populations se sont mélangées et la répartition des activités est actuellement beaucoup moins nette. D'une part, sous la pression démographique, l'agriculture a envahi rapidement toutes les terres cultivables, tandis que ce qui reste des grands troupeaux de bovins a été refoulé dans les savanes de l'Est ou sur les hautes terres (crête Zaïre-Nil et volcans). D'autre part, 50 % des ménages d'agriculteurs possèdent aujourd'hui quelques caprins et ovins et 30 % ont une ou deux vaches. Avec des exploitations de 0,4 ha, il n'est plus possible de développer l'élevage et la culture fourragère : la jachère est sur le point de disparaître et les pâturages sont restreints aux abords des chemins et aux bosquets privés ou communaux. On tend donc inexorablement vers un élevage de petits animaux en stabulation quasi permanente (chèvres, porcs, poules). Cela pose le problème de la fumure des terres jusqu'ici assurée par le fumier de bovins : déjà, la disponibilité en fumier ne permet plus d'entretenir la fertilité que sur 30 % des surfaces (ROOSE *et al.*, 1992). Il va donc falloir intensifier la production de fumure organique (stabulation et paillage) et faire appel à un complément minéral.

Le problème majeur de ce pays à vocation agricole, sans grande ressource minérale ni commerciale, est d'assurer l'autosuffisance en aliments et en bois à une population très dense (150 à plus de 800 habitants au kilomètre carré), sans dégrader les paysages formés de grosses collines à pentes fortes et longues.

Tant que la population était dispersée, les problèmes d'érosion étaient peu importants et le maintien de la productivité des terres était assuré par la jachère, la migration et le défrichement de nouvelles terres. Mais, dès les années trente, les populations du Rwanda, concentrées sur certaines montagnes, ont posé des problèmes liés à la famine et la protection des sols (TONDEUR, 1950). L'administration coloniale a dès lors imposé des cultures pérennes (café, manioc) et des structures antiérosives (lignes d'herbes ou

fossés aveugles). Ces stratégies d'équipement rural (DRS et CES) imposées par l'État ont été mal acceptées par les paysans car les terrassements exigent beaucoup de travail à l'implantation et à l'entretien, sans augmenter sensiblement les rendements des cultures.

Aujourd'hui, le problème se pose en d'autres termes. La population double tous les vingt ans et sa densité dépasse déjà 250 habitants au kilomètre carré en moyenne. Les deux tiers des terres cultivées sont acides, épuisées, dégradées. Il ne reste presque plus de réserve de terre cultivable. La pression foncière est telle que des pentes de plus de 80 % sont défrichées, décapées dès la seconde saison de culture ou surpâturées. Il n'est plus temps de « conserver les sols », ils sont déjà très pauvres et leur niveau de productivité est très faible (400 à 800 kg/ha de haricot, maïs ou sorgho, 1 à 3 t/ha de manioc ou de patates douces). Malheureusement, le commerce des produits agricoles est peu développé et il n'existe pas d'industrie pour absorber l'excès de population.

Le nouvel objectif est donc clair : il faut gérer l'eau, la biomasse et la fertilité des sols pour doubler la production tous les dix ans, tout en améliorant le niveau de vie et l'environnement rural. Sans une vigoureuse politique de gestion des populations, il est peu probable qu'on puisse éviter à l'avenir les misères que le pays connaît régulièrement depuis des siècles (famine, maladie, guerre interne, émigration). La disponibilité en engrais minéraux étant réduite, nous avons cherché à tester l'efficacité de l'agroforesterie pour maîtriser le ruissellement et l'érosion sur les fortes pentes, pour augmenter la production d'une biomasse utile (bois, fourrage, paille) et pour recycler les éléments nutritifs dispersés dans l'atmosphère (azote) ou dans les horizons profonds du sol.

Les situations sont très variées au Rwanda, du point de vue des risques d'érosion. Nous n'aborderons pas les problèmes d'aménagement de la zone volcanique (un tiers du territoire), ni de la bordure du lac Kivu, ou de la crête Zaïre-Nil où les risques de glissement de terrain sont très élevés (pluies de 2 000 mm, pentes longues et vertigineuses et secousses sismiques fréquentes). Dans cette synthèse, nous présenterons d'abord l'état des connaissances, puis les résultats obtenus en parcelles expérimentales sur le plateau central (à la station Isar de Rubona, près de Butaré) et dans la zone basse des savanes de l'Est (station Isar de Karama). Enfin, nous discuterons de la place de l'agroforesterie dans la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols sur ces montagnes tropicales humides à forte densité de population.

L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le milieu et les risques

Du point de vue des risques d'érosion, les deux zones choisies diffèrent sérieusement.

Les savanes de l'Est (altitude : 900 à 1 500 m) reçoivent 800 à 1 000 mm de pluie par an au cours de deux saisons humides. Elles constituent une zone de collines basses (pentes inférieures à 15 %), moins arrosée et moins peuplée (malaria et diverses maladies tropicales) et, par conséquent, moins exposée aux risques d'érosion que le reste du pays. La majeure partie de l'est de cette zone est actuellement vouée à l'élevage extensif, bien que les sols soient relativement fertiles. Les sols ferrallitiques ou ferrugineux y sont moins acides et moins désaturés qu'ailleurs, mais le ruissellement y est plus actif (croûte de battance) et les cultures souffrent chaque année de l'irrégularité de répartition des pluies et du déficit pluviométrique. La gestion des eaux superficielles est probablement le problème majeur du développement agricole de cette zone : les pertes par érosion et par drainage sont modérées (Ndayizigiye, 1993, comm. pers.).

Le plateau central (altitude : 1 500 à 2 000 m) reçoit entre 1 200 et 1 500 mm de pluie en dix mois. L'érosivité des pluies (R_{USA} de 250 à 500 unités) est importante, et la population agricole très dense (250 à 800 habitants au kilomètre carré) est obligée de cultiver toutes les terres, y compris les pentes de plus de 40 % sur les flancs des collines convexes.

Durant la première saison (septembre à décembre), les pluies sont fines et deux fois moins énergétiques qu'en Afrique occidentale (Roose *et al.*, 1992) : elles tombent sur un sol sec, bien drainant, bien travaillé manuellement, et font assez peu de dégâts. En revanche, en seconde saison (février à juin), on observe quelques averses intenses et plus importantes (60 à 100 mm par jour) : si elles tombent sur des sols déjà humides, ou sur des champs en forte pente ou finement préparés pour recevoir les semences, elles forment des rigoles qui décapent l'épaisseur du sol cultivé sur toute la longueur de la parcelle. Ces masses de terre érodée colmatent facilement les fossés antiérosifs ; le ruissellement accumulé dans les fossés déborde alors et creuse des ravines qui vont détruire les aménagements antiérosifs jusqu'au bas du versant.

L'horizon humifère est rapidement décapé non seulement par l'érosion en rigole, mais aussi par l'érosion mécanique sèche, suite aux nombreuses façons culturales : deux labours profonds (pour enfouir les adventices) et deux sarclages à chaque saison culturale entraînent 30 à 40 tonnes de terre à migrer le long du versant jusqu'au premier obstacle, de telle sorte que les talus croissent de 15 à 30 cm par an.

À ce régime, la couverture pédologique des sommets des collines est vite éliminée et laisse apparaître les altérites et des blocs de roche. Le réservoir d'eau qu'elle constitue diminue. Lors des séquences pluvieuses importantes, des masses d'eau dévalent de ces sommets dégradés et ravinent les versants, modifient le rythme des rivières, augmentent leurs débits de pointe, attaquent les berges, désé-

quilibrent les versants et charrient les galets qui tapissent le fond des rivières. L'équilibre précaire de ces montagnes est rompu par les défrichements abusifs, le surpâturage, les cultures peu couvrantes sur des pentes vertigineuses et l'exploitation des pierres qui protègent le fond des rivières.

Les sols ferrallitiques sont généralement très désaturés, très acides (des pH de 3,8 à 5 sont fréquents), carencés en P et N et pauvres en bases. Ils semblent très perméables sauf s'ils sont localement tassés (pistes, chemins de bétail, cours d'habitation), caillouteux ou battus par les pluies. Ces sols retiennent peu l'eau (1 mm d'eau disponible par centimètre de sol) et les nutriments (1 à 5 méq/100 g de terre fine) : d'où l'importance de maintenir un taux de matière organique suffisant. Ils sont souvent rajeunis par l'érosion, avec une nappe de gravats ou de graviers ferrugineux entre 30 et 100 cm de profondeur (fig. 2 ; toposéquence de Rubona).

L'érodibilité des sols est faible (à moyenne sur schiste) : l'indice K de Wischmeier est généralement inférieur à 0,20 (ROOSE et SARRAILH, 1989-1990 ; NDAYIZIGIYE, 1993 b). On observe peu de pellicule de battance sur les collines à cause des nombreuses façons culturales et de l'érosion décapante sur les fortes pentes. Le ruissellement démarre généralement par engorgement des terres tassées par le bétail, des sols décapés, caillouteux et peu épais des sommets de pente, des zones d'habitation et des pistes.

En dehors des deux périodes de plantation, les paysages sont verdoyants, car les pluies sont réparties (bien qu'irrégulièrement) sur presque toute l'année. Les risques d'érosion seraient donc modérés si les pentes cultivées n'étaient pas aussi raides et longues (BERDING, 1992). Au cours de deux enquêtes réalisées dans l'ensemble du pays, il est apparu que 50 % des terres cultivées ont plus de 18 % de pente, 20 % ont plus de 40 % de pente, 6 % ont plus de 65 % de pente (limite des terrasses) et 1 % des terres a plus de 80 % de pente.

Deux phénomènes viennent encore aggraver localement les risques d'érosion.

— Les problèmes fonciers. Lors d'un héritage, par souci d'équité, chaque héritier reçoit une part égale de chaque terre, ce qui revient à découper la parcelle originale en autant de lanières verticales qu'il y a d'héritiers. Il en résulte que, sur les collines à forte densité de population (installation ancienne), des parcelles étroites et très longues sont mises en culture au même moment, ce qui aggrave sérieusement les risques d'érosion en nappe décapante jusqu'en bas du versant. Une fois ce décapage amorcé, il se répète d'année en année aux mêmes endroits car il est difficile d'empêcher le ruissellement de rejoindre les points bas du champ. La terre est rapidement ruinée. Le droit foncier devrait être modifié.

— Les glissements de terrain. Lors d'une campagne d'aménagement d'une colline, lorsqu'on creuse des fossés d'absorption totale sur des pentes de plus de 40 % ou dans

des sols peu profonds sur une altérite glissante (schiste, gneiss, roche micassée ou cendres volcaniques sur dômes granitiques), on déséquilibre le versant. Il arrive qu'à la fin d'une longue série d'averses (surtout s'il y a des

secousses sismiques) la couverture pédologique gorgée d'eau glisse à partir d'un de ces fossés jusqu'à la rivière que la masse de terre peut barrer temporairement (WASSMER, 1981 ; MOEYERSONS, 1989-1990).

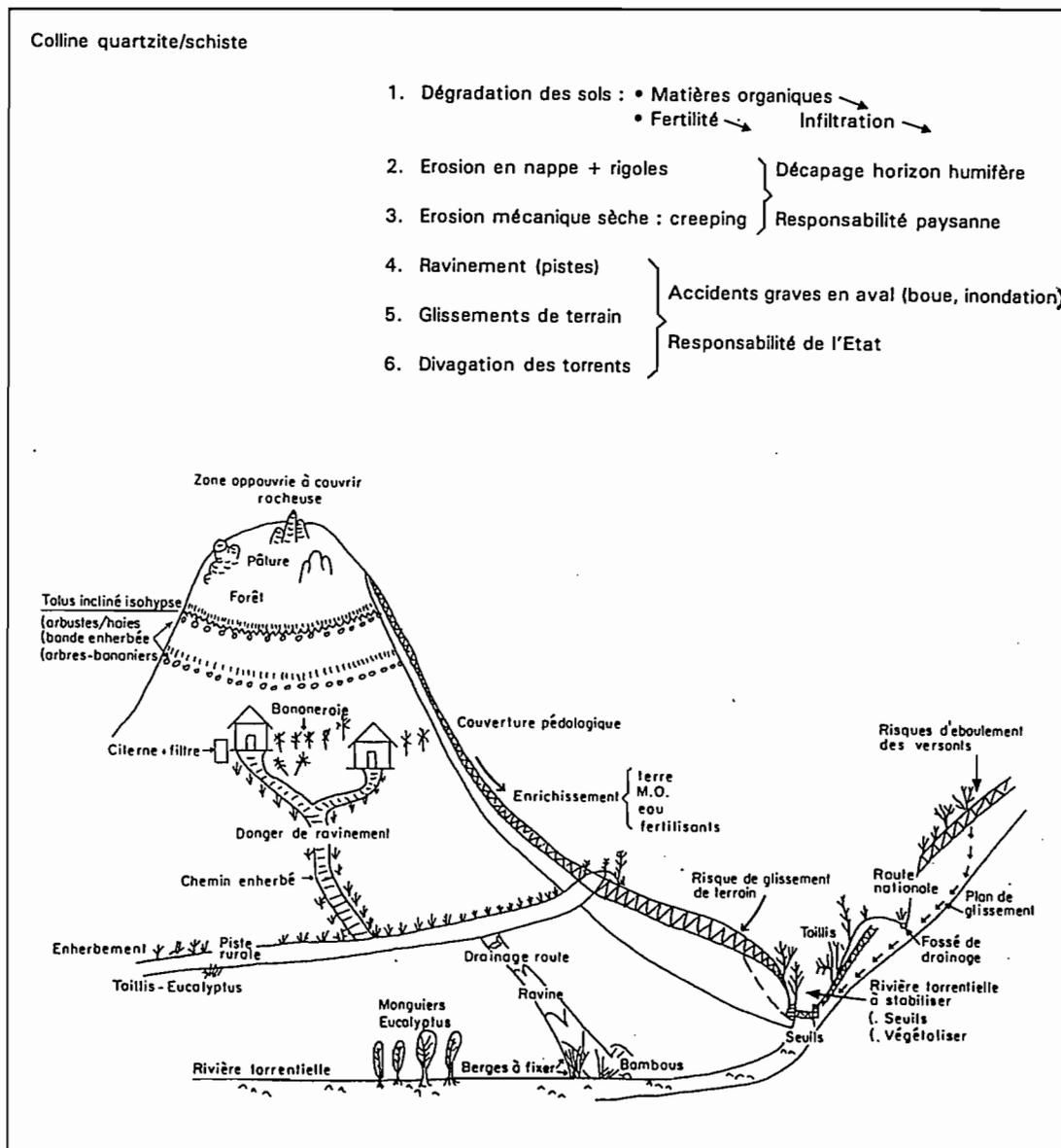


FIG. 2. — Six processus d'érosion aboutissant à la dégradation du milieu rural. D'après ROOSE, 1992.
Six erosion processes are degrading rural environment. After ROOSE, 1992.

Les risques d'érosion en nappe et en rigole

Au Rwanda et au Burundi, on dispose d'environ 250 mesures fiables d'érosion annuelle à l'échelle de parcelles de 100 m² (20 m de longueur) assez voisines des champs paysans, réalisées sur des pentes fortes (25 à

60 %), sauf pour les bananeraies de l'Iraz (Institut de recherche agronomique et zootechnique), où la pente est de 8 % sur des sols ferrallitiques plus ou moins rajeunis ou colluvionnés, très désaturés et acides, mais résistant bien à l'agressivité des pluies (Kusle = 0,2 à 0,1) (tabl. I).

TABLEAU I

Érosion et ruissellement sur petites parcelles (5 m x 20 m) sur des sols ferrallitiques acides et des pentes fortes (25 à 60 %) au Rwanda et au Burundi. D'après les résultats de l'Isar à Rubona (NDAYIZIGIYE, 1988-1993), du Pasi à Butaré (KÖNIG, 1992), de l'Iraz (RISHIRUMUHIWA, 1992) et de l'Isabu (DUCHAUFOR et BIZIMANA, 1992)
Erosion and runoff rate on standard runoff plots (20 m x 5 m) on acid ferrallitic soils and steep slopes (25 to 60 %) in Rwanda and Burundi. After Isar data in Rubona (NDAYIZIGIYE, 1988-1993), Pasi data in Butaré (KÖNIG, 1992), Iraz data (RISHIRUMUHIWA, 1992) and Isabu (DUCHAUFOR and BIZIMANA, 1992)

Couvert végétal	Aménagement	Erosion (t/ha/an)	Ruissellement (Kram %)
Sol nu, travaillé	Cultivé dans le sens de la pente	300 à 550	10 à 40
Manioc ou patates, maïs-haricots ou pois-sorgho en cultures associées	Buttage traditionnel à la houe	50 à 150 (300)	10 à 37
Cultures + 200 arbres/ha	Litière 50 kg/arbre/an	30 à 50 (111)	5 à 7
Cultures + arbres + haies vives tous les 5 à 10 m	Biomasse de 3 à 6 kg/m/an	an 1 : 7 à 16 an 4 : 1 à 3	10 à 15 1 à 3
Idem + arbres + haies vives	+ billons couverts tous les 5 m	1 à 4	0,1 à 2
Bananaeraie	ouverte, paillis exporté (10 t/ha/an) ou complète, paillis étalé ou en cordons	20 à 60 1 à 5	5 à 10 (45) 0 à 2
Caféière ou manioc	+ paillis épais	0 à 1	0,1 à 10
Forêts de <i>Pinus</i> , prairies, vieilles jachères	5-15 t/ha/an de litière	0 à 1	1 à 10

Chiffres entre parenthèses : valeurs maximales observées exceptionnellement

De ces résultats expérimentaux sur les parcelles, nous retiendrons les points suivants :

— les risques d'érosion en nappe et en rigole sont très élevés sur les sols nus travaillés (300 à 550 t/ha/an) : ils varient beaucoup plus en fonction des averses que de la pente (entre 20 et 60 %) ; à ce rythme, il suffirait de cinq à dix ans pour décaper l'horizon humifère (20 cm) ;

— les risques de ruissellement (Kram = 10 à 40 %) peuvent être graves sur ces pentes fortes lorsqu'elles sont mal couvertes (cas des sols dégradés par la culture ou le surpâturage) ; il est donc nécessaire de mettre au point des techniques de gestion de ces eaux dangereuses sur les longs versants raides ;

— les méthodes culturales et les associations traditionnelles réduisent déjà bien, mais pas assez, les risques d'érosion à l'échelle de la parcelle ($C_{USLE} = 0,2$ à $0,5$) ;

— les arbres dispersés dans les cultures améliorent peu la conservation des sols ;

— les haies vives d'herbes ou de buissons disposés tous les dix mètres, complétées éventuellement par un gros

billon couvert de légumineuses ou de patates douces tous les cinq mètres, présentent une première solution valable ;

— le paillage (testé sous bananier, caféier ou manioc) est une seconde solution directement efficace même sur pente forte (20 à 60 %), le problème étant de produire la biomasse nécessaire ;

— la reforestation en pins (la litière d'aiguilles est très efficace), ou en d'autres espèces sylvoles admettant un sous-étage, réduit très vite le ruissellement et l'érosion à des valeurs acceptables (DUCHAUFOR et BIZIMANA, 1992).

Les fossés aveugles et les terrasses radicales ne peuvent être étudiés valablement sur ces petites parcelles (5 m de largeur). Sur les terrains aménagés par les projets de lutte antiérosive, on a observé que ces méthodes peuvent augmenter les risques de ravinement et de glissement de terrain sur les couvertures pédologiques peu épaisses ou trop pentues (plus de 40 %). Ce ne sont pas les structures antiérosives seules mais les arbres et les systèmes de culture qui jouent le rôle principal dans la stabilisation des versants.

En conclusion, ces paysages verdoyants peuvent donner l'impression d'être stables à certains experts pressés, habitués aux terres ravinées et dénudées des régions semi-arides. En réalité, les sols sont très pauvres, des pentes très fortes (60 à 100 %) sont cultivées par nécessité (manque de terre), les pluies sont surabondantes à certaines époques et trop espacées à d'autres, le couvert végétal offert par les cultures sur les terres les plus dégradées est trop léger pour protéger le sol des divers processus d'érosion en action sur les collines du Rwanda.

Les méthodes traditionnelles

Les cultures sont réparties autour de l'habitat (dispersé sur les collines) en relation directe avec la fertilisation des sols. Quand un jeune ménage installe son enclos (*rugo*) sur une plate-forme taillée dans la colline, il plante tout autour sa bananeraie qui va recevoir la majeure partie des nutriments disponibles (déchets familiaux, résidus de culture, cendres, épiluchures et latrines). Entre les bananiers poussent les cultures vivrières associées : maïs, haricots, colocases, patates et condiments. Un petit champ de maïs associé aux haricots reçoit un peu de fumier/compost ; le sorgho semé à la volée y pousse en seconde saison.

Les seules parcelles non érodées sont les parcelles paillées sous caféier. En effet, pour éviter les amendes consciencieusement distribuées par les encadreurs du ministère de l'Agriculture, la parcelle de café (un ou deux ares) est paillée abondamment avec des tiges de manioc, de sorgho, diverses herbes arrachées aux talus et des feuilles de bananier. A part la bananeraie, les autres terres (deux tiers de l'exploitation) ne reçoivent ni fumier, ni engrais, et se dégradent forcément sous des cultures très frugales comme le manioc et la patate douce.

Les adventices sont soigneusement arrachées lors des sarclages, soit pour nourrir les bêtes à l'étable, soit pour couvrir les sillons et réduire l'érosion, soit encore pour être entassées en gros tas couverts de terre et aussitôt plantés de boutures de patate douce, selon les saisons et les besoins. De toute façon, le recyclage des végétaux est très rapide.

Les parcelles sont dispersées, parfois à plusieurs kilomètres de l'habitat (champs loués). Les inconvénients sont nombreux (perte de temps en parcours, difficulté pour les garder et les fumer), mais la dispersion des champs permet aussi de faire face aux risques climatiques (orages et grêle localisés, dégâts dus aux animaux et aux maladies). Les jeunes technocrates rêvent d'habitat concentré dans des villages et de remembrement des terres pour lancer une agriculture intensive, moderne et motorisée. C'est une grave erreur dans un pays ne disposant d'aucune alternative (ni industrie, ni voie d'eau internationale, ni commerce) pour nourrir l'abondante population rurale rejetée des campagnes. De plus, les terres sont trop pentues pour risquer d'y introduire les tracteurs (rentabilité peu proba-

ble, risques de tassement), et ce qui fait la richesse des terres actuellement (déchets familiaux) deviendra un polluant bien difficile à gérer à l'échelle d'un village.

Les techniques culturales exigent beaucoup de travail et sont souvent réalisées par des groupes de voisins à l'aide de deux outils élémentaires : la machette (parfois recourbée en faucille) et une houe à long manche. Après une courte jachère (quelques mois à deux ans), les sols envahis par les herbes sont nettoyés superficiellement puis labourés profondément pour enfouir l'herbe (à 30 cm et plus). Les stolons et autres racines persistantes sont séchés en tas et compostés ou brûlés. Un mois plus tard, la parcelle est retravaillée finement pour le semis en poquet (maïs, haricot) ou à la volée (sorgho de seconde saison) ; un second semis d'une culture associée peut intervenir après le premier sarclage pour remplacer les poquets manquants et couvrir toute la surface.

Tout est travaillé manuellement à la houe. La traction animale, difficile sur les fortes pentes, n'intéresse personne : ce n'est pas la coutume de faire travailler les animaux. Il n'existe pas de motorisation (hors de prix à de telles distances de la mer), on observe peu d'horizon tassé en profondeur et le drainage semble s'effectuer normalement.

La formation de billons ou de grosses buttes est limitée à la culture des tubercules et à l'enfouissement des adventices. Dans les vallées et les marais, en revanche, la culture sur des planches surélevées ou sur de grosses buttes est la règle générale pour assurer un bon drainage.

En dehors de l'épandage de fumier dans les champs proches de l'habitat (souvent plus de 20 t/ha), la conservation de la fertilité des sols est assurée par les associations culturales, les rotations, l'enfouissement des adventices et la jachère courte. Il existe cependant une technique de lutte antiérosive traditionnelle réservée aux très fortes pentes, en particulier pour la culture du pois sur schiste et sur les hautes terres du nord et de la crête Zaïre-Nil (NYAMULINDA, 1989). Il s'agit de « terrassettes en escalier » d'un mètre de largeur, taillées dans le versant tout en préservant le système racinaire des touffes d'herbe. Cela permet de dégager l'espace nécessaire à une double ligne de maïs-haricot ou de petits pois. Le talus (de 0,5 à 1 m de hauteur) est solidement maintenu en place par le réseau racinaire des graminées. L'intérêt majeur de ces terrasses étroites est de maintenir la planche cultivée dans l'horizon humifère, alors que plus les terrasses sont larges, plus on perturbe l'organisation du sol et on met à nu les horizons profonds stériles (ROOSE *et al.*, 1992). Dans la technique traditionnelle, on bascule la moitié de la planche du haut sur celle du bas en deuxième année : cela revient à déplacer mécaniquement la couche superficielle du sol tout au long du versant. Des essais en parcelle d'érosion ont montré que cette méthode améliorée (c'est-à-dire en cultivant les planches en courbe de niveau et en exploitant les herbes du talus) permet d'arrêter toute érosion et de gérer au mieux

les eaux de pluie, même sur des sols schisteux et sur des pentes de 60 % (NDAYIZIGIYE, 1993 ; NYAMULINDA et NGIRUWONSANGA, 1992).

Enfin, on peut observer localement une technique de gestion des eaux ruisselant sur les chemins : il s'agit de creuser une fosse en haut de pente où l'on dirige le ruissellement et sa charge sédimentaire. Dès que la fosse est à moitié pleine de sédiments, on y plante une touffe de bananiers, lesquels profitent de ces apports d'eau et de nutriments. Quand la première fosse est presque pleine, on en creuse une autre plus bas (Rudumburi) (NYAMULINDA, 1989).

En conclusion, les méthodes traditionnelles ont permis de maintenir la stabilité du paysage et un niveau modeste de production. Maintenant que la population est devenue trop dense pour conserver suffisamment de terres en jachère, il s'agit d'intervenir pour maintenir les terres en place, mais aussi pour augmenter rapidement leur productivité (à la fois en vivrier et en bois de chauffe) : c'est ce qui a été tenté sur des parcelles d'érosion.

RÉSULTATS DES EXPÉRIMENTATIONS AGROFORESTIÈRES

Dans les sols ferrallitiques acides, il est bien difficile de maintenir et surtout de restaurer la fertilité des sols cultivés en continu (ROOSE et GODEFROY, 1967 ; PIERI, 1988). L'incorporation judicieuse d'arbres et d'arbustes dans les systèmes agricoles et pastoraux est l'un des moyens possibles pour résoudre les problèmes d'érosion, de dégradation de la fertilité des sols et du manque de bois de chauffe (KANG *et al.*, 1984 ; EGLI, 1985 ; NEUMANN et PIETROWICZ, 1985 ; YAMOA *et al.*, 1986 ; BALASUBRAMANIAN et SEKAYANGE, 1992).

Aussi a-t-on tenté d'imiter le système forestier qui réduit les pertes minérales par érosion grâce à la litière et les pertes par lessivage grâce au puissant réseau racinaire capable de ramener des horizons profonds les nutriments qui ont échappé aux racines superficielles des cultures, et de les concentrer dans les horizons superficiels. On dispose aujourd'hui au Rwanda d'une série de résultats sur la productivité des arbres, des haies vives et des cultures associées, sur la remontée des nutriments ainsi que sur leur effet sur les risques de ruissellement et d'érosion.

Effet des arbres isolés et des haies vives (projet Pasi à Ruhandé/Butaré)

Dans l'expérimentation de Ruhandé, le projet Pasi a tenté de régénérer et stabiliser la productivité du sol par l'intégration des arbres (*Grevillea robusta*, *Cedrella odorifera*, *Polyscias fulva*, *Maenopsis emini*, etc.) et des haies vives (*Leucaena leucocephala* et *Calliandra calothyrsus*) dans la production vivrière, le remplacement de la jachère pluriannuelle par une « jachère simultanée » (engrais vert semé sous la culture précédente, ou culture en couloir entre les haies) et par un recyclage des éléments nutritifs et de

la matière organique (compostage en tas et stabulation presque permanente du petit bétail) (KÖNIG, 1992).

KÖNIG (1992) a montré (fig. 3) l'importance des pertes en terre sur sol nu (560 t/ha/an) et sous manioc traditionnel (300 t/ha/an). L'implantation d'arbres isolés (200 arbres à l'hectare) ne suffit pas à ralentir suffisamment l'érosion (110 t/ha) : il faut planter des haies vives tous les 5 à 10 m. En deux ans, les haies vont couvrir 10 à 20 % du terrain. Introduites sur des microterrasses de 50 cm de largeur, les haies de *Calliandra* ont réduit à 1/100 l'érosion du témoin sous manioc tout en produisant 5 à 15 t/ha/an de biomasse utilisable comme fourrage, paillis et bois de feu. Avec une production de 9 t/ha de feuilles, les haies vives taillées trois fois l'an ont mobilisé jusqu'à 105 kg d'azote, 47 kg de P₂O₅, et 26 kg de K₂O. Malgré leur forte croissance initiale, les lignes d'herbe (*Setaria splendida*) produisent moins de biomasse et les touffes s'épuisent au bout de quatre ans. Sur ces sols pauvres et très acides, le système des cultures en couloir est beaucoup plus efficace que les engrais verts qu'il faut réinstaller tous les deux ans. Le mélange de quatre légumineuses enfouies (*Tephrosia vogellii*, *Cajanus cajan* et deux crotalaires) n'a guère amélioré la production des cultures ultérieures.

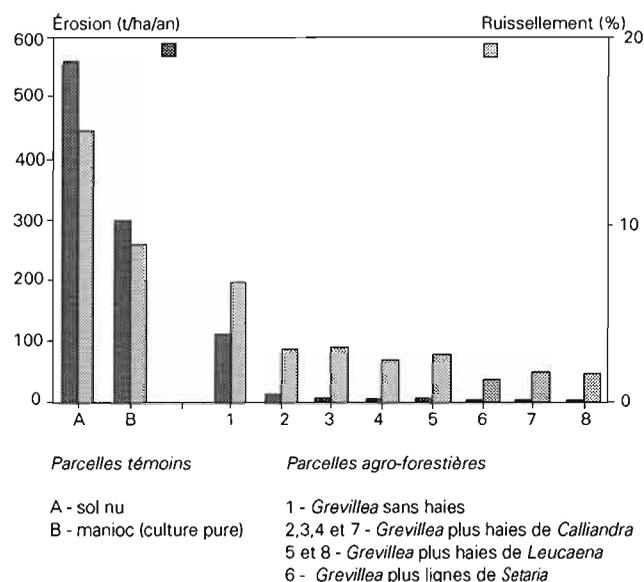


FIG. 3. — Agroforesterie et érosion à la station Pasi de Ruhandé/Butaré. D'après KÖNIG, 1992.

Agroforestry and erosion experiments at the Pasi station of Ruhande/Butare. After KÖNIG, 1992.

Dans cette expérience sur un sol très acide (pH 3,8), les méthodes agroforestières seules n'ont pas réussi à rétablir la fertilité du sol : des essais annexes ont montré qu'il fallait intégrer au compost des phosphates et 3 t/ha de travertin écrasé pour améliorer l'efficacité de l'aménagement. Malgré une production de 18 à 25 t/ha de biomasse (coupée en petits morceaux), les engrais verts installés

sans fumure minérale complémentaire restent sans effet sur les cultures suivantes. La fixation d'azote par les légumineuses est entravée par les déficiences du sol (acidité et carence en phosphore) et l'extension très lente du couvert végétal a pour conséquence de fortes pertes de terre, même en seconde saison culturale.

LES RECHERCHES SUR LES HAIES VIVES
À LA STATION ISAR DE RUBONA

La station de Rubona est située à 15 km de Butaré (altitude : 1 630 m ; longitude : 29° 41' est ; latitude : 2° 29' sud), à la limite du plateau central schisto-quartzitique

et de la dorsale granitique (DELEPIERRE, 1982). Les profils creusés près des parcelles expérimentales ont montré la présence de résidus quartzitiques dans les horizons B et C, mais l'altérite est de nature granitoïde. Les précipitations atteignent en moyenne 1 170 mm répartis en deux saisons des pluies s'étalant sur dix mois. Au milieu d'un versant convexe-concave de la colline Kangunda, sur une pente de 23 %, Ndayizigiye a installé neuf parcelles d'érosion (4,5 m x 22,2 m) sur un sol ferrallitique rouge dont l'horizon humifère (C = 1,7 %) est argilo-sableux très désaturé, très acide et carencé en N, P, K et Mg (fig. 4).

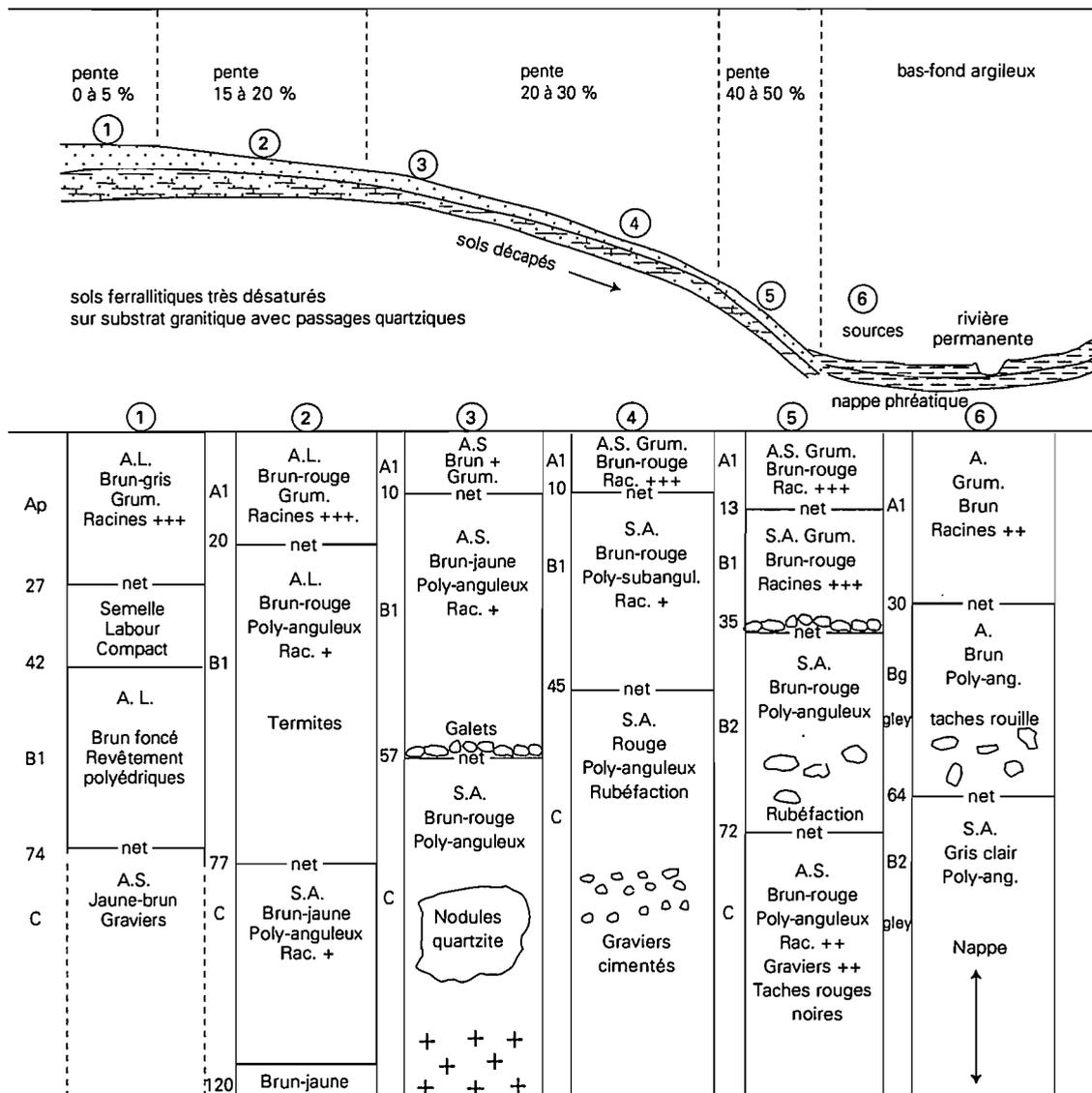


FIG. 4. — Toposéquence des parcelles d'érosion à la station Isar de Rubona. D'après NDAYIZIGIYE, 1993 b. Le taux d'argile croît en profondeur (de 40 % en surface à 60 % au-delà de 40 cm) et vers le bas du versant. L'horizon humifère est pauvre (C = 1,5 à 2 % ; C/N = 10 ; Al éch. = 3 méq/100 g ; Ca éch. = 1,2 à 2 méq/100 g ; Mg éch. = 0,10 méq/100 g ; K éch. = 0,08 méq/100 g ; CEC = 5 à 10 méq/100 g), acide (pH eau = 4,3 à 4,8) et argilo-sableux (A = 40 à 60 % ; L = 6 à 11 % ; SF = 23 à 10 % ; SG = 30 à 20 % ; refus = 3 à 50 %).
Soil catena at the erosion experimental at the Isar station of Rubona, Rwanda. After NDAYIZIGIYE, 1993 b.

Pendant quatre ans (1990-1993), il a comparé au témoin international (sol nu travaillé) et au témoin régional (rotation maïs-haricot en première saison et sorgho en seconde saison) l'influence sur l'érosion et la production de trois types de haies vives : deux lignes de *Calliandra* plantées à 20 cm en quinconce, deux lignes de *Leucaena leucocephala* et une ligne de *Calliandra* suivie d'une ligne de *Setaria splendida*. Chaque traitement a été répété deux fois, mais, comme les résultats sont très voisins, nous ne présenterons que les moyennes.

Les études préliminaires ont montré que les fortes pertes en terre observées au cours de la seconde saison de culture sont liées aux séries de pluies tombant sur des sols peu couverts déjà gorgés d'eau, qui entraînent la formation de rigoles. Pour combattre ce processus, nous avons tenté de dissiper l'énergie du ruissellement en étalant la nappe d'eau sur les parcelles cultivées (labour grossier et paillage par les émondes des haies) et sur les haies vives implantées tous les sept mètres. En réalité, l'efficacité des haies dépend essentiellement du paillis constitué des déchets de sarclage, des brindilles provenant de la taille des haies ou du *Desmodium* rampant sous les haies, l'ensemble étant retenu sur les talus par les tiges des arbustes. Le frottement de la nappe d'eau sur ces surfaces rugueuses dissipe l'énergie du ruissellement, atténue sa force vive, l'empêche de se concentrer, de prendre de la vitesse et donc de creuser les rigoles.

LE RUISSÈLEMENT

Sur la figure 5, on observe que le ruissellement est modeste ($K_{ram} = 2$ à 12%), mais augmente au fil des années sur les terrains nus et sous cultures traditionnelles. En effet, le taux de matière organique du sol et la structure des horizons de surface se dégradent avec le temps. En revanche, lorsque les cultures sont protégées par des haies, le ruissellement se stabilise vers 2% des pluies annuelles grâce aussi à l'apport de fumier de parc (au moins 10 t/ha/an) et des émondes disposées en paillis. Le ruissellement maximal observé lors des plus fortes averses est semblable les deux premières années sur les témoins et les parcelles qu'on vient de planter de haies ($K_{rmax} = 15$ à 44%) : le dispositif est donc homogène. Les années suivantes, on observe une augmentation du ruissellement maximal sur les témoins ($K_{rmax} = 48$ à 68%) mais pas sur les parcelles protégées par les haies ($K_{rmax} = 19$ à 35%). Malgré ces pointes de ruissellement, en cas de grosses averses, les pertes en terre sont restées modestes en présence des haies vives.

L'ÉROSION

La figure 6 montre que, pour des précipitations variant de $1\ 000$ à $1\ 200\text{ mm}$, les risques d'érosion sur sol nu varient de 250 à 500 t/ha/an d'une année à la suivante en fonction de l'agressivité des pluies. Sous cultures associées (maïs-haricot, puis sorgho), les pertes en terre attei-

gnent encore 120 à 250 t/ha/an (facteur C de Wischmeier = $0,5$). Mais lorsque la culture associée reçoit les émondes des haies (paillage aux périodes les plus délicates), plus 10 t/ha de fumier (enfoui), l'érosion devient négligeable dès la deuxième année (1 à 2 t/ha/an). Les haies vives (ou plutôt le filtre de pailles fixé par les haies) maîtrisent donc très efficacement le ruissellement et l'érosion en nappe et en rigole : les rares ravines observées dans les paysages rwandais sont en général en relation avec le drainage des chemins, des cours d'habitation et des routes.

LA PRODUCTION DE BIOMASSE ET LES REMONTÉES BIOLOGIQUES

La production de biomasse par les haies vives augmente progressivement durant les quatre premières années (fig. 7). La matière sèche produite par les haies croît de $0,8$ à $2,6\text{ kg}$ par mètre linéaire pour *Leucaena* et de $1,4$ à $3,6\text{ kg}$ pour *Calliandra*. La présence de *Setaria* à l'aval des arbustes donne les meilleurs résultats en première année, mais, par la suite, la productivité de l'herbe diminue régulièrement. *Leucaena* paraît un peu moins productif que *Calliandra* sur ces sols acides ($\text{pH} < 5$).

Si les haies étaient plantées tous les dix mètres, la production de biomasse, stable au bout de quatre années, varierait de $2,6\text{ t/ha/an}$ (*Leucaena*) à $3,6\text{ t/ha/an}$ (*Calliandra*) et on pourrait espérer des remontées biologiques de l'ordre de 102 à 124 kg/ha/an d'azote, 6 à $9,2\text{ kg/ha/an}$ de phosphore et de 17 à 28 kg/ha de potassium (NDAYIZIGIYE, 1993 a) qui seraient redistribués sous forme de paillage (ou d'engrais verts enfouis) au cours de la croissance des cultures. Ces chiffres sont plus modestes que ceux de KÖNIG (1992). On pourra constater dans le tableau V que ces apports par la litière ne sont pas suffisants pour assurer une production satisfaisante et encore moins pour restaurer la fertilité du sol.

L'IMPACT SUR LA PRODUCTION VIVRIÈRE

Nous avons espéré (avec les écologistes allemands) que, en combinant la maîtrise de l'érosion (réduction des pertes) et l'apport des émondes et de dix tonnes de fumier de parc, la fertilité ou tout au moins la productivité du sol s'améliorerait progressivement, sans apport d'intrants d'origine étrangère.

En réalité, le niveau de production est resté médiocre et a même légèrement régressé au cours des deux premières années de culture : de 500 à 250 kg/ha de maïs grain, de 800 à 500 kg/ha de haricot en première saison (fig. 8) ; la production de sorgho en seconde saison s'est maintenue autour de 500 kg/ha (fig. 9). La troisième année, suite à l'apport de 20 t/ha de fumier, les rendements ont augmenté de 32 à 68% dans les parcelles protégées par les haies. Devant la stagnation de la production (malgré l'aménagement foncier), nous avons décidé de restaurer la fertilité du sol en apportant les intrants nécessaires pour corriger le pH ($2,5\text{ t/ha}$ de chaux), revitaliser le sol (10 t/ha de

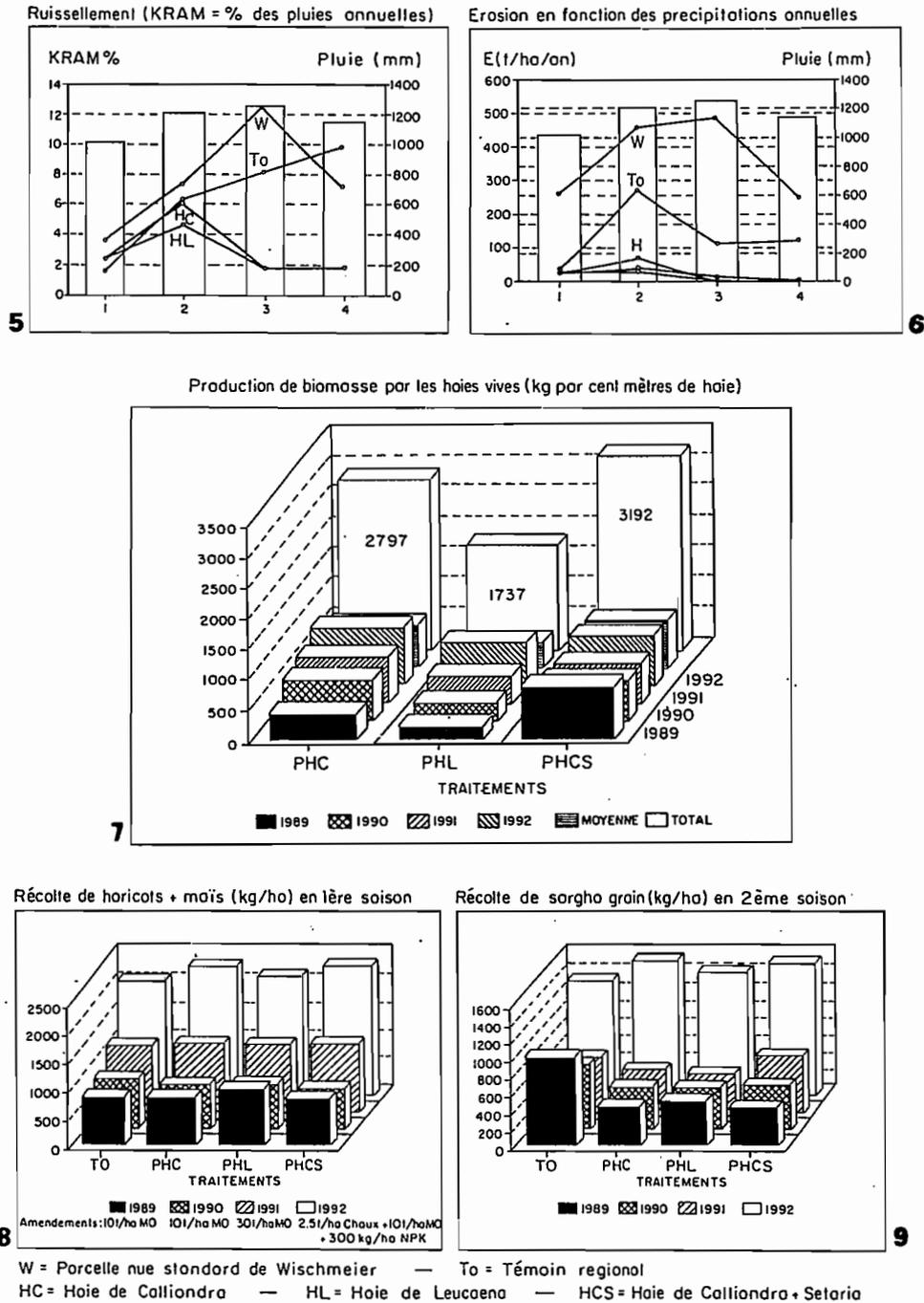


FIG. 5, 6, 7, 8, 9. — Influence de trois haies vives sur le ruissellement (5), l'érosion (6), la production de biomasse (7), la récolte des deux saisons à la station de Rubona (pente de 23 %) (8 et 9). D'après NDAYIZIGIYE, 1993.

Influence of three types of living hedges on runoff rate (5), erosion in t/ha/year (6), biomass production (7), two seasonal yields at Rubona station (8 and 9). After NDAYIZIGIYE, 1993.

fumier de parc) et de nourrir directement les cultures (apport de N 51, P 51, K 51 en première saison et de N 34, P 34, K 34 sur sorgho). La production s'est alors nettement améliorée (plus de 2 400 kg/ha de maïs grain et haricot, et 1 500 kg/ha de sorgho grain), avec un léger avantage pour les parcelles protégées par les haies (malgré 15 % de perte de surface cultivable). Malheureusement, les événements ne nous ont pas permis de tester les arrière-effets de cet apport massif d'intrants dont on peut se demander ce qu'il va rester après l'exportation par les pailles et les pertes par érosion et surtout par drainage.

En comparant les apports par 10 t/ha de fumier de parc et 3,6 t/ha de biomasse aux exigences en NPK, chaux et fumier propres à chaque culture sur les sols ferrallitiques acides du Rwanda (cf. tableau V ; d'après RUTUNGA, 1992), on peut comprendre que, même si l'érosion est maîtrisée, le recyclage de la biomasse produite sur la parcelle ne peut suffire à améliorer significativement la production vivrière. En effet, les sols, les plantes, les animaux — et les matières organiques qui en sont issues — sont carencés dans les mêmes éléments (surtout P et N). En revanche, on a pu tripler les rendements et valoriser les travaux de lutte antiérosive après correction de l'acidité (2,5 t/ha de chaux tous les trois ans ont suffi pour éteindre la toxicité aluminique) et fertilisation minérale pour nourrir les cultures (60 unités de NPK suffisent pour ce niveau de production des céréales) sans rechercher la correction des carences du sol lui-même.

La culture en couloir à la station Isar de Karama

La station de Karama (longitude : 30° 13' est ; latitude : 2° 17' sud), près de laquelle furent implantés les essais, est située à 1 400 m d'altitude. La pluviosité annuelle

moyenne est de 836 mm répartis en deux saisons. La grande saison sèche dure quatre mois, avec de grandes variations interannuelles imprévisibles. Le sol est classé parmi les ferralsols (FAO/UNESCO, 1987) : l'horizon humifère est peu acide (5,5), pauvre en carbone (0,8 %), azote et phosphore assimilable, mais bien pourvu en bases.

BALASUBRAMANIAN et SEKAYANGE (1992) ont étudié les performances de cinq espèces d'arbustes et l'effet des remontées biologiques réalisées par ces haies sur la production vivrière et l'évolution des propriétés du sol dans un environnement semi-aride des savanes du sud-est du Rwanda. Les haies de *Calliandra calothyrsus*, *Cassia spectabilis*, *Leucaena leucocephala* et *Sesbania sesban* ont été plantées en novembre 1983. Les *Sesbania* n'ont pas survécu aux tailles : ils ont été remplacés par *Leucaena diversifolia* en 1985. Plantés à 50 cm d'intervalle en lignes simples, tous les cinq mètres, les haies occupent 20 % du terrain. Les parcelles cultivées (5 m x 20 m) reçoivent chaque année 10 t/ha de fumier de parc sur la moitié de leur surface.

Ces arbustes ont atteint trois à quatre mètres de hauteur seize mois après leur plantation. La production de biomasse a régulièrement augmenté : au bout de quatre ans, on a récolté (en matière sèche) 3,2 à 4,8 t/ha/an d'émondages (feuilles et tiges vertes), plus 2 à 3,5 t/ha/an de bois de feu.

La remontée annuelle de nutriments par la biomasse foliaire (enfouie avant plantation) atteint selon les espèces 72 à 119 kg/ha/an d'azote, 2 à 3 kg de phosphore (sol très carencé en P), 47 à 94 kg de calcium, 8 à 19 kg de magnésium et 29 à 60 kg de potassium. Cet apport minéral équivaut à peu près à celui de dix tonnes de fumier de parc (N = 89 ; P = 12,2 ; K = 65 ; Ca = 84 ; Mg = 17) (tabl. II).

TABLEAU II
Remontées annuelles de nutriments apportés par la biomasse foliaire des haies vives et le fumier de ferme à la station Isar de Karama, Rwanda (BALASUBRAMANIAN et SEKAYANGE, 1992)
Turn-over : nutrients included in the biomass produced by living hedges and in dry dung manure at the Isar station of Karama, Rwanda (BALASUBRAMANIAN and SEKAYANGE, 1992)

Source de biomasse	Matière sèche (t/ha)	N	P	K (kg/ha)	Ca	Mg
Addition de nutriments à travers les feuilles						
<i>Calliandra calothyrsus</i>	3,4	73,8	2,6	29,2	46,7	10,3
<i>Cassia spectabilis</i>	3,8	94,8	3,1	52,6	49,5	7,6
<i>Leucaena leucocephala</i>	3,3	72,4	2,6	29,4	61,8	9,9
<i>Leucaena diversifolia</i> *	4,8	119,1	3,2	59,8	94,3	18,5
<i>Sesbania sesban</i> **	1,2	25,6	1,4	14,0	16,2	4,4
Addition de nutriments à travers le fumier de ferme						
Fumier de ferme	7,03	89,2	12,2	65,1	84,3	17,0

* Moyenne de 3 ans (1986-1989).

** Moyenne de 2 ans (1984-1986).

Il est surprenant de constater que *Cassia*, qui ne nodule pas, a fixé 20 kg d'azote de plus que *Calliandra* et *Leucaena*. La capacité de tous ces arbustes à fixer le phosphore est faible car le sol est fortement carencé en phosphore. La variabilité est plus forte pour N, K, Ca et Mg. Les différences étant dues en majorité à la production de biomasse, les meilleurs arbustes pour la région semblent

être *Cassia spectabilis* puis *Leucaena diversifolia* ; les autres souffrent d'attaques des termites.

ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS DE L'HORIZON HUMIFÈRE

L'enfouissement des produits verts de la taille des haies quatre fois l'an pendant cinq ans a réduit le déclin de la fertilité du sol depuis le défrichement de la savane (tabl. III) :

TABLEAU III
Évolution de quelques propriétés de l'horizon humifère du sol après enfouissement des émondes des haies et pour partie du fumier de ferme de la station de Karama (1983-1987)
Evolution of some properties of the humiferous soil horizon after plowing in manure and/or pruned biomass at the Isar Karama station (1983-1987) (BALASUBRAMANIAN and SEKAYANGE, 1992)

Traitement	C organique (%)	pH eau	pH KCl	K éch.	Ca éch.	Mg éch.	CEC
				----- (mmol/kg) -----			
Octobre 1983							
Sol vierge	8,0	5,52	4,70	4,90	13,00	8,00	37,20
Juin 1981							
				Sans fumier			
Témoin	5,5	5,27	4,91	2,9	16,90	6,80	35,80
<i>Calliandra calothyrsus</i>	6,1	5,29	4,96	2,8	17,50	7,30	42,00
<i>Cassia spectabilis</i>	6,6	5,56	5,29	3,1	25,60	8,90	52,20
<i>Leucaena leucocephala</i>	5,6	5,45	5,11	2,9	18,10	7,30	42,30
<i>Sesbania sesban</i>							
<i>Leucaena diversifolia</i>	5,3	5,13	4,63	2,8	17,50	6,90	36,70
SE	0,5	0,16	0,18	0,20	3,10	0,70	5,50
				Avec fumier			
Témoin	6,6	5,99	5,74	5,0	28,8	9,8	52,6
<i>Calliandra calothyrsus</i>	7,2	5,84	5,53	5,1	26,9	10,0	63,5
<i>Cassia spectabilis</i>	7,1	6,06	5,75	5,0	30,6	10,3	71,2
<i>Leucaena leucocephala</i>	7,2	6,05	5,46	5,6	23,8	9,7	62,7
<i>Sesbania sesban</i>							
<i>Leucaena diversifolia</i>	7,4	5,91	5,63	4,9	25,0	8,5	47,7
SE	0,4	0,18	0,15	0,3	3,5	1,1	8,8

SE = erreur standard

c'est le cas pour le taux de carbone du sol (+2 à 20 %), le potassium (-3 à +7 %) et surtout le magnésium (+7 à 31 %), le calcium (+4 à 51 %) et la capacité d'échange des cations (+2 à 40 %). L'apport complémentaire de fumier améliore particulièrement le carbone, le potassium, le calcium, le pH et la CEC, sans pour autant restaurer le niveau primitif de fertilité du sol. Phosphore et azote restent déficitaires.

INFLUENCE DE LA CULTURE EN COULOIR SUR LA PRODUCTION VIVRIÈRE

L'enfouissement des émondes a augmenté la production en grain du sorgho et du haricot en fonction de la biomasse enfouie : les arbustes les plus efficaces sont donc *Cassia spectabilis* puis *Leucaena diversifolia* (les plus productifs).

La réponse du maïs à l'enfouissement de la biomasse a été médiocre comme à Rubona car la carence en phosphore reste le facteur limitant. La production de patate douce a diminué à cause de la concurrence des arbustes, plantés tous les cinq mètres (perte de 20 % de surface cultivable).

En conclusion, à Karama, les arbustes ont bien résisté à la taille (sauf *Sesbania*) et au stress hydrique, mais seuls *Cassia spectabilis* et *Leucaena diversifolia* ont survécu aux attaques des termites et semblent performants et adaptés aux zones semi-arides de savane de moyenne altitude.

L'incorporation des émondes et de dix tonnes de fumier par an a limité la chute de la fertilité du sol (sauf en phosphore, en potassium et magnésium pour lesquels le sol est déficient), mais n'a pas restauré son niveau primitif.

Le système de culture en couloir défini ci-dessus est compatible avec les céréales et les haricots, mais les patates douces ont souffert de la compétition hydrique. On peut envisager d'espacer les haies (jusqu'à 10 m), mais dans ce cas on réduit la production de biomasse fertilisante et leur rôle de restauration de la fertilité du sol.

On voit bien l'intérêt de l'usage des haies vives pour maîtriser l'érosion, mais aussi les limites de cette pratique pour restaurer la fertilité initiale et améliorer significativement la productivité. Ces techniques devraient pouvoir

être améliorées. Par exemple, pour réduire la concurrence entre les arbustes et les cultures, il faudrait étudier les rythmes et la hauteur de taille du couvert aérien et surtout mettre au point la taille des racines superficielles pour favoriser l'enracinement profond des arbres.

DISCUSSION : L'AGROFORESTERIE ET LA GCES

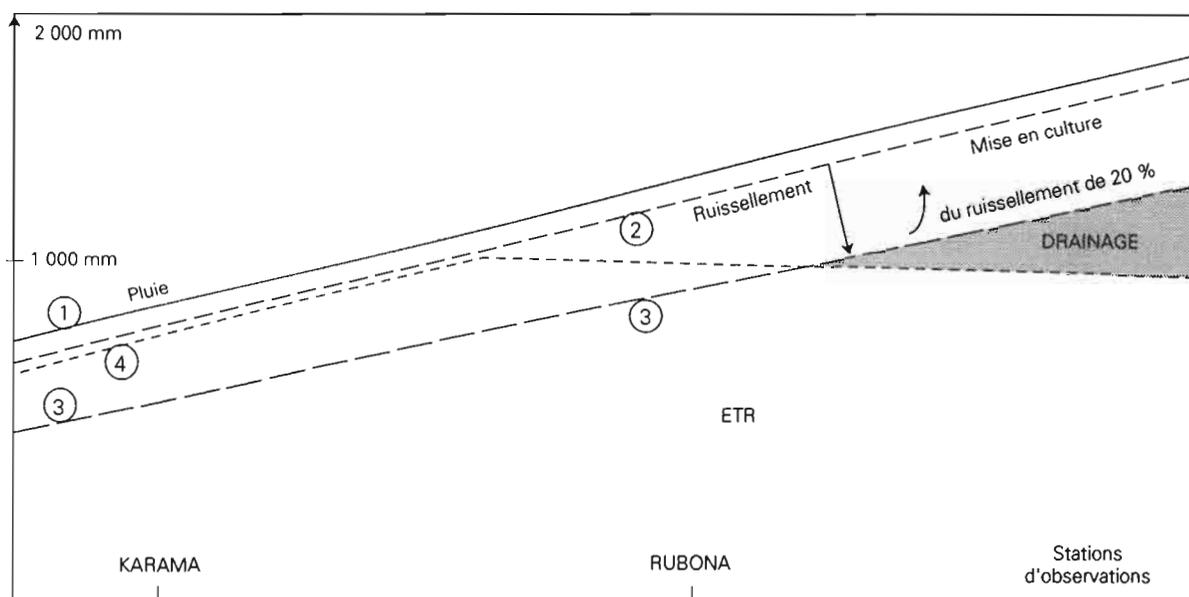
Les résultats exposés ci-dessus confirment l'intérêt, en montagne tropicale densément peuplée, de l'introduction de certaines espèces d'arbres et d'arbustes dans ces systèmes agropastoraux pour intensifier la production, par l'amélioration de la gestion des eaux superficielles, de la matière organique disponible et des nutriments (KANG *et al.*, 1984 ; YAMOAHA *et al.*, 1986).

La gestion de l'eau

L'implantation d'arbres, et surtout de haies vives, réduit les risques de ruissellement à 2 % du bilan annuel et à 35 % des plus grosses averses tombant sur un sol déjà humide. Cela implique une augmentation de l'infiltration, du stock d'eau disponible pour la croissance végétale ou du drainage, ainsi que l'obligation de prévoir la gestion des eaux excédentaires tout au long du versant (structures antiérosives et techniques culturales).

ADAPTATION DE LA GESTION DE L'EAU À CHAQUE RÉGION CLIMATIQUE (Fig. 10)

En région semi-aride (en particulier les savanes de l'est), la mise en culture entraîne une forte augmentation



En zone semi-aride

Si ruissellement ↑, le DRAINAGE → 0
 ETR ↓
 production de biomasse ↓

En zone humide

DRAINAGE ↓ ETIAGE ↓
 ETR →
 Débits de pointe } des rivières
 débits solides }

- 1 = Pluie qui augmente de 800 à + 2 000 mm
- - - - 2 = Pluie - ruissellement sous végétation naturelle
- 3 = Pluie - ruissellement sous culture (augmente de 200 à 400 mm)
- - - - 4 = Évapotranspiration réelle qui ne diminue que s'il y a du ruissellement en zone semi-aride
- = Drainage en profondeur hors de portée des racines, vers la nappe et les sources

Conclusion : en région très humide, la réduction du ruissellement n'augmente pas les rendements, mais bien le drainage et les écoulements de base (source)

FIG. 10. — Schéma de bilan de l'eau : effet du ruissellement (et de la lutte antiérosive) sur le drainage profond et l'ETR.
 Draft of annual water balance : influence of runoff and soil conservation programs on deep drainage and evapotranspiration.

du ruissellement et une réduction de l'évapotranspiration, donc de la production de biomasse. Par conséquent, l'impact de la lutte contre le ruissellement (amélioration de l'infiltration et stockage localisé) peut être considérable, en zone semi-aride, sur les rendements des cultures qui souffrent autant de sécheresse que de carences minérales : les agriculteurs seront vite intéressés par les techniques de gestion du ruissellement.

En région humide ($P > 1\ 000$ mm), le défrichement et la mise en culture entraînent une augmentation des risques de ruissellement, des débits de pointe des rivières et donc des risques d'érosion des berges. Par conséquent, on observe une réduction du drainage, de la lixiviation des engrais... et du débit d'étiage des sources et des rivières. La lutte contre le ruissellement (et l'érosion) aura donc relativement peu d'effet sur les rendements des cultures, sauf s'il existe des périodes de sécheresse aux phases sensibles du cycle de croissance. C'est là une des causes du manque d'effet sur les rendements de la lutte antiérosive dans les collines humides du Rwanda : les autres sont la pauvreté chimique, l'acidité des sols et l'augmentation des risques de lixiviation des nutriments.

En conclusion, si on réduit le ruissellement par les techniques culturales et (ou) les structures antiérosives appropriées, il est nécessaire d'intensifier la production végétale afin d'éviter l'accroissement des risques de lixiviation des nutriments dans les eaux de drainage et les risques de glissement de terrain sur les fortes pentes : d'où l'intérêt des cultures associées, de la fertilisation et de l'agroforesterie.

Enfin, la présence de plusieurs niveaux de couvert végétal se traduit par le piégeage d'un volume de pluie important par la canopée des arbres et un déficit « à l'ombre de ces arbres », donc de fortes irrégularités dans les apports d'eau au sol. Heureusement, si le sol est suffisamment perméable, le réseau racinaire s'incruste profondément dans la roche altérée de telle sorte qu'on observe généralement moins de glissements de terrain lorsqu'il reste des arbres (TEMPLE et RAPP, 1972).

QUATRE MODES DE GESTION DE L'EAU

On peut définir quatre modes de gestion des eaux de surface en fonction des conditions pédo-climatiques. À chacun de ces modes correspondent des structures antiérosives et des techniques culturales particulières (ROOSE *et al.*, 1992) (tabl. IV).

TABLEAU IV
Structures antiérosives et techniques culturales en fonction du mode de gestion des eaux de surface, adaptées au Rwanda
Antierosive structures and cultural practices in relation to runoff water management on the hills of Rwanda

Mode de gestion	Structures antiérosives	Techniques culturales
<i>Agriculture sous impluvium</i> Zone aride à semi-aride	Impluvium, citerne Terrasses discontinues	Labour, cuvettes, microbassins localisés
<i>Infiltration totale</i> Zone semi-aride ($P < 400$ mm) ou zone humide sur sol très perméable	Fossés aveugles Terrasses radicales	Labour + billons cloisonnés Paillage
<i>Diversión</i> Climat semi-humide, mois très humides Sol peu perméable	Fossés de diversion Terrasse radicale drainante	Billons obliques ou dans le sens de la pente, ou en alternance, ou en arêtes de poisson
<i>Dissipation de l'énergie du ruissellement</i> Tous climats, sols semi-perméables Pentes pas trop raides ($< 60\%$)	Cordons ou murs de pierres Talus enherbés, lignes d'herbes Haies vives Agroforesterie Microterrasses en escalier	Labour motteux Cultures alternées/prairie Paillis

Au Rwanda, il faudra choisir le mode de gestion de l'eau en tenant compte :

- des besoins en eau pendant la saison sèche (impluviums et citernes pour une irrigation d'appoint) ;
- des risques d'engorgement du sol à certaines périodes (diversion dangereuse sur les pentes fortes : dissipation de l'énergie par les microbarrages perméables des talus) ;
- de l'épaisseur du sol et de sa capacité d'infiltration sans risque de glissements de terrain (fossés aveugles, terrasses radicales).

Les structures antiérosives les mieux adaptées

Les citernes d'eau potable collectant 10 à 50 m³ d'eau propre venant des toits réduisent considérablement les corvées d'eau, améliorent le niveau d'hygiène et permettent un petit élevage en stabulation, la production de fumier et la création d'un jardin multiétagé intensif autour des habitations.

Les fossés d'absorption totale favorisent l'infiltration des eaux de ruissellement sur les versants de moins de 20 % de pente sur sols profonds et perméables. Ils exigent malheureusement beaucoup de travail (200-350 jours par hectare et par an pour l'installation, plus 20 à 50 jours pour l'entretien) et n'améliorent guère les rendements des cultures (d'où l'abandon par les paysans). Leur principal intérêt réside dans la transformation progressive du paysage en terrasses peu pentues. Les fossés de diversion sont à proscrire sur les pentes fortes (plus de 15 %), car ils aboutissent forcément au ravinement des exutoires.

Les microbarrages perméables (cordons d'herbes, de pierres, haies vives, talus enherbés) ont pour objectif de ralentir les eaux de ruissellement, de dissiper leur énergie en les étalant en nappe et de provoquer le dépôt des sédiments. Les cordons de pierres et d'herbes ne sont efficaces que sur les pentes de moins de 20 %. Les haies vives ne sont pas totalement efficaces les deux premières années, sauf si on apporte un paillis au pied des arbres. Dès la troisième année, les haies bloquent l'érosion. Il se forme rapidement un talus (20 à 30 cm par an) et une terrasse progressive que l'on peut transformer en deux terrasses horizontales (gradin) : l'une enrichie (réservée à la culture intensive), l'autre appauvrie (cultures frugales comme le manioc et les patates douces) dont il faut restaurer la fertilité (fig. 11). Le travail est plus progressif (50 à 100 jours par hectare et par an pour l'installation, plus 10 à 20 jours pour l'entretien) ainsi que le besoin en fertilisants.

Les gradins horizontaux (appelés localement « terrasses radicales ») permettent d'absorber toutes les eaux (pluie plus ruissellement entre terrasses) et de capitaliser la fumure qu'on y accumule. Mais il doit être clair que la terrasse radicale exige de gros investissements en travail (500 à 1 200 jours par hectare à l'installation) et en intrants (10 t/ha de fumier, 1 à 5 t/ha de chaux plus la fumure propre à chaque culture) avant de restaurer la fertilité naturelle du sol. Il ne faut donc choisir cette méthode que si l'on dispose des intrants et des moyens de valoriser le surplus de production (marché et routes praticables), et si les risques de glissement de terrain sont exclus. Il paraît raisonnable d'introduire des cultures arborées fruitières aujourd'hui absentes (comme dans les monts Uluguru, en Tanzanie).

Les microterrasses en escalier (largeur cultivée d'environ un mètre) sur talus enherbés fixés (maximum 100 cm) exigent beaucoup moins de travail et stabilisent bien les versants raides en cas de culture manuelle associée car les

racines des cultures restent dans l'horizon humifère d'origine. Contrairement à la technique traditionnelle, il vaut mieux maintenir en place le réseau herbacé qui protège le talus.

Les techniques culturales correspondantes

Les techniques culturales qui modifient l'état de la surface du sol, sa rugosité, sa couverture végétale, les activités de la mésofaune et/ou sa capacité d'infiltration sont souvent très efficaces pour réduire le volume ruisselé et dissiper son énergie.

Le labour à plat en grosses mottes est indispensable sur les sols trop tassés. Il augmente temporairement l'infiltration, améliore le stockage de l'eau et aide à enfouir les résidus de culture et à lutter contre les adventices. Malheureusement, il ralentit l'activité des vers de terre, réduit la cohésion du matériau et augmente son érodibilité par les eaux de ruissellement, surtout lorsqu'on sème sur un lit d'agrégats très fins. Il serait intéressant d'étudier les méthodes de travail minimal bien connues dans les Andes (ROOSE, 1994).

Le buttage et le billonnage, parallèlement à la pente, accumulent localement la bonne terre humifère permettant de produire de gros tubercules, mais ces pratiques sont dangereuses sur forte pente car elles concentrent le ruissellement en filets capables de creuser des rigoles et des ravines et d'arracher les graviers et autres cailloux protégeant de la battance des pluies. Sur des pentes de plus de 25 %, les paysans préfèrent souvent organiser un réseau de billons courts et bien couverts dans le sens de la pente pour éviter les risques majeurs de glissement de terrain et de ravinement qu'ils ne peuvent maîtriser.

Le billonnage cloisonné perpendiculaire à la pente améliore le stockage de l'eau lors des petites averses, mais peut donner lieu à du ravinement ou à des glissements de terrain lors des plus fortes averses. Seuls de gros billons (hauteur = largeur > 40 cm) protégés en permanence par une végétation rampante (par exemple, patates douces ou légumineuses fourragères) à moins de cinq mètres d'écartement peuvent casser l'énergie du ruissellement sur les versants. L'association avec des haies vives permet de stabiliser rapidement les versants raides (de 20 à 60 %).

Gestion de la biomasse

Au Rwanda, la majorité des paysans sont trop pauvres pour acheter assez d'engrais minéraux pour intensifier la productivité de leurs terres. Traditionnellement, pour maintenir ou restaurer la productivité de leurs champs, ils ne disposent que de la biomasse produite sur leurs champs, sur les jachères, les côtés des routes et les forêts communales, etc. L'application des méthodes de DRS + CES (fossés) n'augmente pas la production de biomasse, mais réduit les surfaces productives. En revanche, la GCES

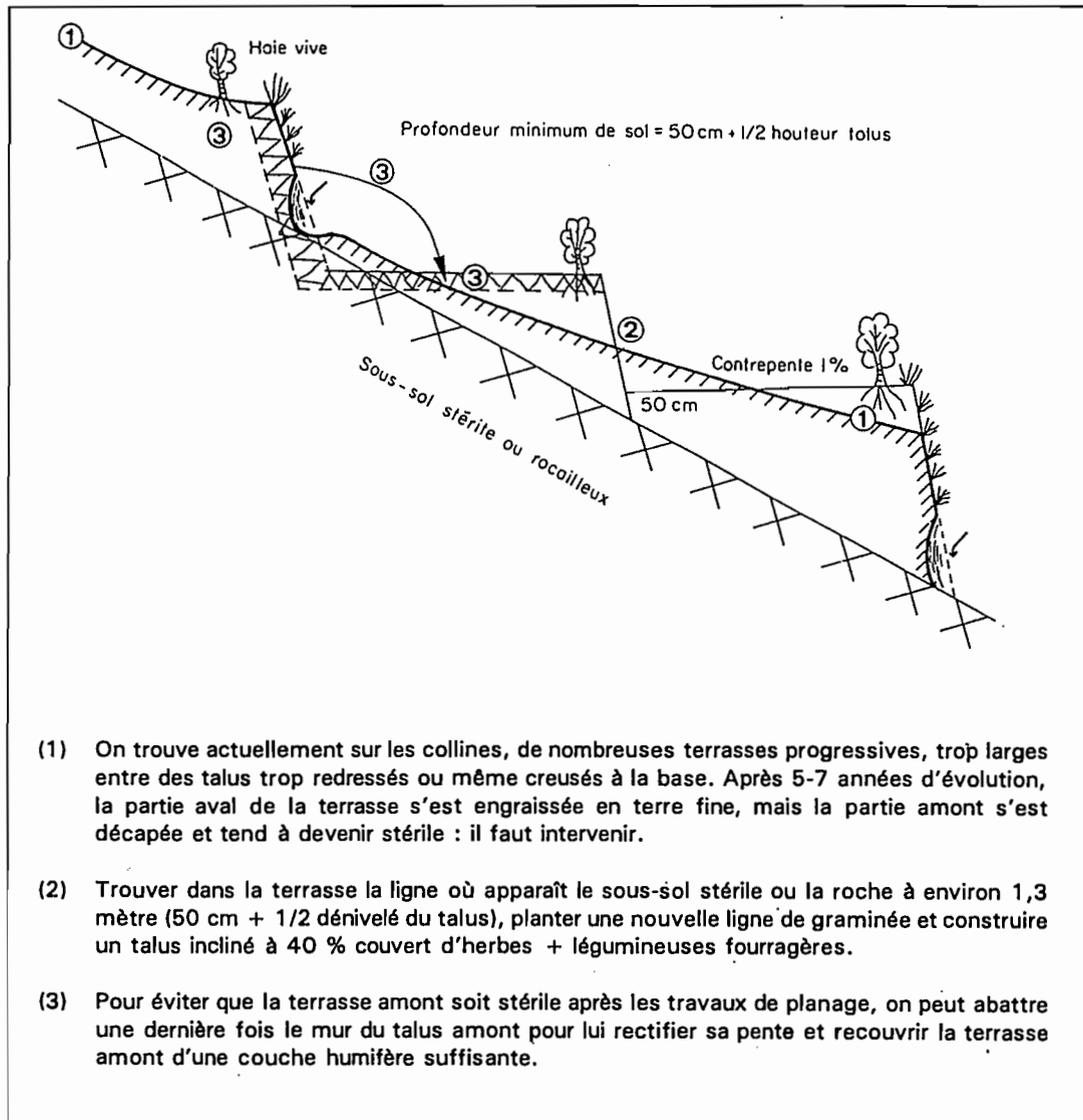


FIG. 11. — Évolution des terrasses progressives en gradins horizontaux. D'après GALLIKER, 1992.
Evolution of progressive to horizontal terraces. After GALLIKER, 1992.

attache beaucoup d'importance à l'amélioration de la production de biomasse et à la gestion judicieuse des matières organiques pour restituer rapidement au sol les nutriments indispensables à la production végétale.

Chaque année, les forêts tropicales africaines restituent au sol 8 à 15 t/ha de litière. Dans les savanes, ce sont 2 à 8 t/ha de feuilles qui retournent au sol à moins que le feu ou le bétail ne les détruisent. Après défrichage (brûlis de la végétation naturelle et mise en culture), le taux de matière organique des couches humifères diminue de 40 % en quatre à dix ans de culture en fonction de la gestion des résidus organiques : fumier, compost, enfouissement direct ou paillage (PIERI, 1989).

Sous culture, la biomasse disponible n'est pas négligeable :

- la culture de maïs et sorgho peut laisser 2 à 5 t/ha tous les six mois de résidus utilisés actuellement pour nourrir le bétail ou pour pailler la plantation de caféiers ;
- soja, arachide et haricot produisent 0,5 à 2 t/ha de fourrage de qualité ;
- manioc et patate douce fournissent 0,5 à 2 t/ha de biomasse utile pour nourrir les cochons ou pailler les caféiers ;
- la bananeraie (à densité 3 m x 5 m) peut produire 3,3 t/ha de stipes et 2 à 6 t/ha de feuilles utilisées comme paillage ou fourrage ;

— les jachères courtes (quelques mois entre les deux cycles culturaux) et les adventices fournissent 0,5 à 2 t/ha de matière verte.

L'agroforesterie peut augmenter fortement la production de biomasse des champs cultivés. Deux cents arbres (*Grevillea robusta*, *Cedrella serrata*, *Poliscias fulva*, etc.) plantés autour ou dans les champs peuvent produire assez de bois de chauffage pour toute la famille et, en plus, 1 à 4 t/ha/an de feuilles et brindilles très appréciées pour le paillage (NEUMANN et PIETROWICZ, 1985).

Plantées tous les cinq à dix mètres, les haies vives de *Calliandra calothyrsus*, *Leucaena leucocephala* ou *diversifolia*, ou de *Cassia spectabilis*, peuvent produire 3 à 9 t/ha/an de feuilles (excellent fourrage) et 2 à 7 t/ha/an de branchettes pour le feu. Ainsi, la biomasse produite sur un champ cultivé par les résidus de culture, les arbres et les haies vives peut dépasser celle des forêts primitives ou secondarisées.

Cependant, avant son recyclage dans le sol, cette biomasse va subir des transformations, avec des pertes importantes de matières organiques et minérales.

La valorisation de la biomasse par l'élevage est recherchée par les paysans car elle produit lait et viandes commercialisables, ainsi que du fumier. Cependant, le rendement de restitution au sol des nutriments et matières organiques est faible (30 à 40 %) et ne permet d'entretenir que le tiers de la surface exploitée. Une tonne de fumier n'apporte que 4 kg de N, 15 kg de P, 12 kg de K, 19 kg de Mg et 25 kg de Ca (RUTUNGA, 1992). Avec vingt tonnes de fumier de ce type, les paysans rwandais améliorent progressivement le statut organique du sol et réussissent la plupart des cultures, mais sur de très petits champs. Sans l'apport des pâtures communales et des fourrages arbustifs (rôle essentiel des haies), ils ne pourront élever que du petit bétail (chèvres et porcs) à cause de la pression foncière.

Le compostage est une filière plus longue (six à dix-huit mois) et à rendement aussi faible que l'élevage, mais sans production de viande. Il exige beaucoup de travail pour humidifier et retourner les tas et transporter deux fois la biomasse (maximum de cinq tonnes par foyer). C'est pourtant une voie intéressante pour les paysans pauvres qui ne possèdent pas de bétail. La méthode la plus efficace consiste à entasser près de l'habitat tous les résidus disponibles avec les cendres et les déchets familiaux dans une petite « fosse compostière-fumière-poubelle », à l'ombre d'un bouquet d'arbres, et de l'arroser avec les eaux usées du ménage.

L'enfouissement des résidus de culture et des adventices est une filière courte qui remplace la jachère, mais elle provoque une faim d'azote parmi les plantes cultivées.

Le paillage épais (25 t/ha) est très efficace pour réduire l'évaporation du sol, le développement des adventices, et arrêter l'érosion. La restitution minérale est un peu plus

lente que l'enfouissement par le labour, mais elle est sans doute plus complète (K, Ca, Mg, C d'abord, par lessivage, puis C, N et P, à mesure de leur décomposition). Sous caféiers et bananiers, ce paillage a fait ses preuves, mais le problème est d'accumuler une telle biomasse. Cependant, un paillage léger (2 à 6 t/ha) ne couvrant même que 50 % de la parcelle réduit de 80 % les risques d'érosion et maintient une bonne activité des vers de terre.

Aucune de ces méthodes n'est parfaite : elles doivent être combinées pour profiter de toutes les opportunités. Mais il est clair que les arbres et haies arbustives ont un rôle majeur à jouer dans l'entretien des matières organiques et minérales des sols.

Jusqu'ici, il semble que les paysans s'intéressent progressivement aux haies vives, plus en tant que source de fourrage en saison sèche et délimitation de leur propriété qu'en tant que pratique conservatoire des sols. L'ensemble de la gestion des haies vives n'a pas encore été complètement assimilé, en particulier la taille des racines et des branches pour limiter la compétition pour l'eau, la lumière et les nutriments entre les cultures.

La gestion de la fertilité des sols

En dehors des zones volcaniques, les sols ferrallitiques désaturés sont très acides et comportent souvent une toxicité aluminique. Leur excellent drainage entraîne un grand risque de lixiviation des engrais dans les eaux de drainage, surtout si le ruissellement est réduit sans intensification de la culture. Dans ce cas, la conservation des sols n'est pas acceptable par les paysans car elle ne valorise pas leur travail : il est indispensable d'introduire simultanément la conservation des sols, le stockage des eaux et la restauration de la fertilité pour améliorer significativement les rendements.

RESTAURER LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS

Un sol dégradé est généralement décapé par l'érosion, tassé, instable, stérile, acide et (ou) carencé, et sujet à un ruissellement intense. Si on laisse faire la jachère naturelle ou si l'on néglige l'une de ces composantes, le temps nécessaire à la restauration est généralement très long. Mais on arrive à restaurer la capacité de production du sol (pas à restaurer toutes les qualités initiales du sol forestier primitif) en quelques mois à condition de respecter les six règles suivantes :

- maîtrise du ruissellement et de l'érosion par un système de production couvrant ;
- travail profond du sol pour réorganiser le drainage et l'enracinement ;
- stabiliser la macroporosité par l'enfouissement de matière organique (ou de chaux) et par une culture à forte production racinaire (sorgho, légumineuses) ;
- revitaliser le sol par un apport de fumier ou compost (3 à 10 t/ha tous les deux ans) ;

— chaulage (2 à 3 t/ha tous les trois ans) pour remonter le pH au-dessus de 5 et supprimer la toxicité aluminique ;
 — apporter un complément minéral (« emballé » dans le compost) alimentant chaque culture à son rythme et supprimant progressivement les carences qui limitent la fertilité du sol.

LA FUMURE D'ENTRETIEN

Comme on l'a vu dans l'essai de Rubona (cf. fig. 8 et 9), une fois l'érosion maîtrisée et la fertilité physique, biologique et chimique du sol restaurée à un niveau acceptable, il reste encore à nourrir les plantes cultivées (fumure localisée) à leur rythme (doses fractionnées) en fonction des objectifs de production (N, 40 à 160 kg/ha/an, + P₂O₅, 30 à 100 kg, + K₂O, 20 à 100 kg), des plantes

cultivées et des risques de lixiviation périodiques. En pratique, il faut gérer au mieux les résidus organiques et y ajouter les compléments minéraux indispensables pour les cultures puisque les sols ferrallitiques ont une très faible capacité de stockage des nutriments (ROOSE et GODEFROY, 1967).

RUTUNGA (1992) a constaté que, sur les terres pauvres du Rwanda, le chaulage (2 à 5 t/ha) doit être renouvelé tous les trois ans et la fumure organique tous les trois cycles culturaux (tabl. V). Sur les terres moyennement riches des savanes de l'est, le chaulage n'est guère utile, mais bien la fumure minérale et organique. Quant aux riches terres volcaniques, les faibles doses de NPK n'ont entraîné jusqu'ici que de faibles améliorations de rendement.

TABLEAU V
 Exigences en NPK, chaux et fumier propres à chaque culture sur les sols ferrallitiques acides du Rwanda. D'après RUTUNGA, 1992
Manure, NPK and lime requirement for each crop on acid ferrallitic soils of Rwanda. After RUTUNGA, 1992

Culture	N	P	K	Chaux, fumier, inoculum
Haricot	34	25-30	34	En fonction des maladies cryptogamiques + inoculum + chaux si pH < 5 + inoculum + chaux + fumier
Soja	20-40	40-50	30-50	
Pois	34	34	34	En altitude + fumier (+ chaux)
Arachide	30	30	0	
Sorgho	60	60	17	
Maïs	78	42	42	
Blé	88	42	42	
Riz irrigué	60	30	30	Pour deux tonnes de paddy Pour six tonnes de paddy + chaux + fumier si en altitude
	100	60	60	
Pomme de terre	50	100	200	Ou 35 tonnes de fumier
Manioc	100	50	100	
Maraîchage	30-50	30-70	100-200	

CONCLUSION : L'AGROFORESTERIE ET L'APPROCHE GCES AU RWANDA

Dans les montagnes tropicales fortement peuplées d'Afrique centrale, les risques d'érosion (300 à 500 t/ha/an) et la dégradation de la fertilité des terres augmentent avec la pente et la densité de la population (150 à 800 habitants au kilomètre carré).

Au Rwanda, la lutte antiérosive est complexe car les processus d'érosion du sol sont nombreux, le référentiel technique est mal adapté à la diversité écologique et les implications socio-économiques et foncières sont multiples. (Pour une proposition d'aménagements de collines en fonction des risques d'érosion, on se reportera à la fig. 12.)

Cependant, il existe des systèmes de production capables de maintenir l'érosion à un niveau tolérable :

- le paillage sous caféiers, bananiers ou manioc ;
- les haies vives et les gros billons en courbe de niveau, couverts en permanence ;

- les engrais verts couvrant la surface du sol ;
- la reforestation produisant une bonne litière.

Le terrassement radical (1 000 jours de travail) ou progressif (100 jours) et les autres structures antiérosives sont moins efficaces que les systèmes biologiques (talus enherbés, haies vives) et exigent plus de travail d'entretien et plus d'espace.

L'agroforesterie (par exemple, 200 arbres à l'hectare plus des haies vives tous les cinq à dix mètres) permet de contrôler l'érosion, de produire fourrage et paillis (4 à 10 t/ha/an) et de récupérer des nutriments en profondeur (N, 20 à 100 kg/ha/an ; P, 10 à 20 kg ; K, 20 à 40 kg ; Ca + Mg, 20 à 40 kg ; etc.) pour des temps de travaux raisonnables (10 à 30 jours par an). Cette biomasse peut être valorisée par l'élevage car le fumier est l'une des clés pour fertiliser les sols ferrallitiques, véritables passoires. Mais ces apports organiques restent insuffisants pour améliorer significativement la productivité du sol.

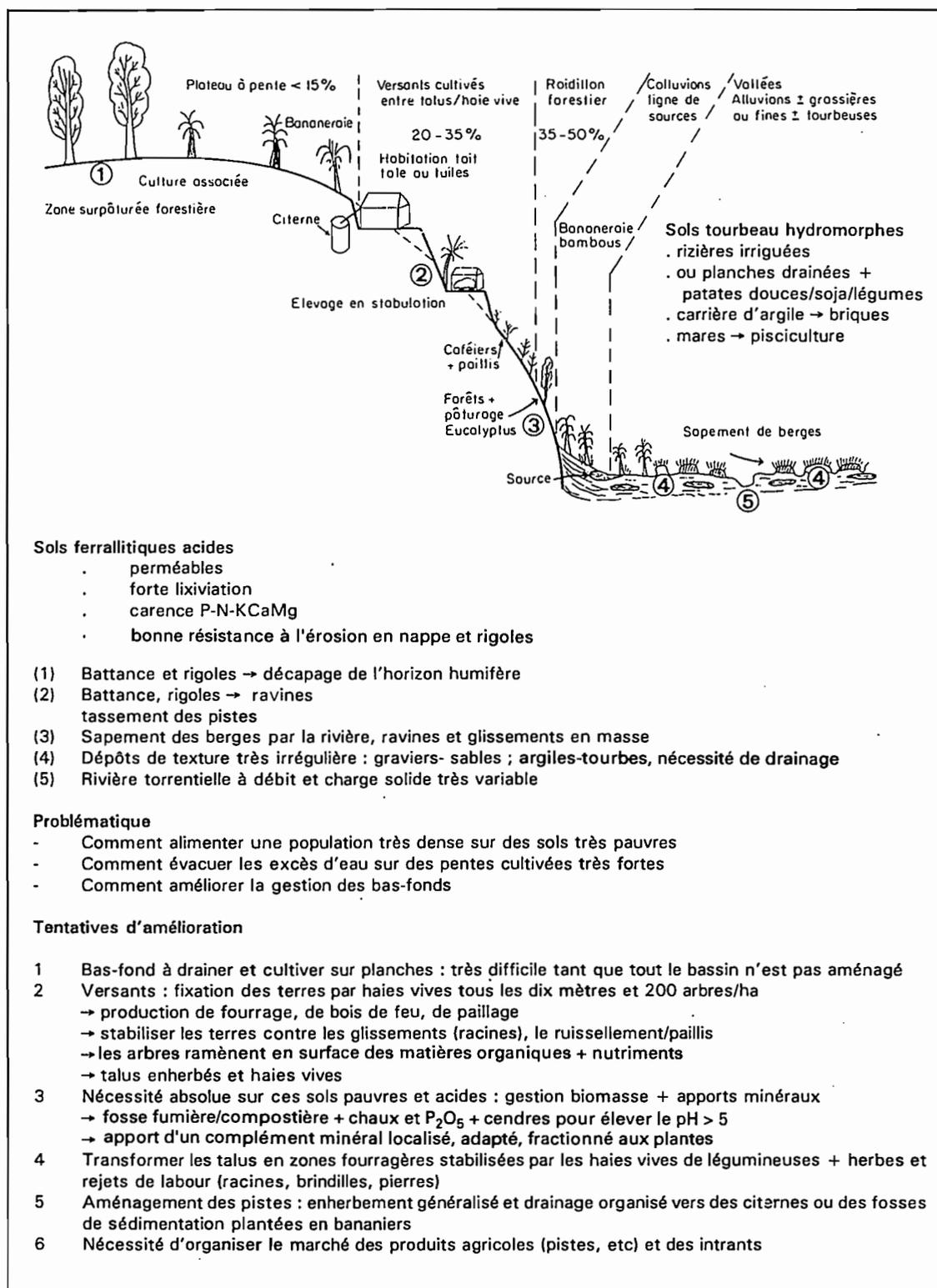


FIG. 12. — Risques d'érosion et propositions d'aménagement des collines granito-gneissiques du Rwanda. D'après ROOSE, 1994. *Erosion risks and management proposal for large granitic-gneiss hillslopes in Rwanda. After ROOSE, 1994.*

Pour relever le défi de doubler la production avant que la population ne double (en vingt ans), la conservation des sols ne suffit pas : par la gestion simultanée des eaux, de la biomasse et des nutriments, on peut à la fois stabiliser les sols et doubler leur productivité. Les apports minéraux complémentaires sont inévitables si on veut améliorer significativement la productivité des sols ferrallitiques acides et du travail.

On peut observer que les plus fortes populations du monde vivent dans des jardins multiétagés où les interactions positives entre l'élevage, les cultures et les arbres sont poussées à l'extrême. En Afrique, il reste encore beaucoup à faire pour atteindre l'intensité de la production des jardins étagés orientaux. C'est un problème d'adaptation culturelle qui exige du temps.

BIBLIOGRAPHIE

- BALASUBRAMANIAN (V.), SEKAYANGE (L.), 1992 — Effets de la culture en couloir sur les propriétés du sol et les performances des arbustes et des cultures vivrières dans un environnement semi-aride au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 180-190.
- BERDING (F.), 1992 — « Les facteurs de l'érosion : état actuel des connaissances ». In : *Séminaire national de conservation des sols*, Minagri, Kigali, Rwanda, 26 p.
- DELEPIERRE (G.), 1982 — Les régions agro-climatiques en relation avec l'érosion du sol au Rwanda. *Bull. Agric. Rwanda*, 2 : 87-95.
- DUCHAUFOR (H.), 1991 — Bilan de dix ans de recherches en parcelles et bassin versant au Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 11 : 36-37.
- DUCHAUFOR (H.), BIZIMANA (M.), 1992 — Restauration de la fertilité des sols et conservation des eaux en régions montagneuses au Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 161-178.
- EGLI (A.), 1985 — La conservation des sols à l'aide de l'agroforesterie : le cas du Rwanda. *Bull. Rech. Agron.*, 20 : 561-87.
- FAO/UNESCO, 1987 — *Soil map of the world at the scale 1/5 000 000*. Revised, 4th draft. Rome, FAO, 116 p.
- GUICHAOUA (A.), 1989 — *Destins paysans et politiques agraires en Afrique centrale. T. 1 : L'ordre paysan des hautes terres du Burundi et du Rwanda*. Paris, L'Harmattan, 208 p.
- KANG (B. T.), WILSON (G. F.), LAWSON (T. L.), 1984 — *Alley cropping: a stable alternative to shifting cultivation*. Ibadan, IITA, 22 p.
- KÖNIG (D.), 1992 — L'agriculture écologique agroforestière. Une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 130-139.
- MOEYERSONS (J.), 1989 — *La nature de l'érosion des versants au Rwanda*. Thèse, univ. Leuven. *Annales Sciences Économiques Musée Tervuren*, 19, 379 p.
- MOEYERSONS (J.), 1989-1990 — Les glissements de terrain au Rwanda occidental : leurs causes et les possibilités de leur prévention. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1) : 131-150.
- NDAYIZIGIYE (F.), 1990 — Aperçu sur les pratiques de conservation des sols et de gestion de l'eau au Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 10 : 87-97.
- NDAYIZIGIYE (F.), 1992 — Valorisation des haies arbustives dans la lutte contre l'érosion en zone de montagne (Rwanda). *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 120-129.
- NDAYIZIGIYE (F.), 1993 a — Effets des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) sur l'érosion, le ruissellement et les rendements (Rwanda). *Bull. Réseau Érosion*, 13 : 41-50.
- NDAYIZIGIYE (F.), 1993 b — *La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols au Rwanda. Analyse des techniques antiérosives et de leurs effets sur la productivité des terres*. Thèse doct., géographie physique, univ. Strasbourg, 235 p.
- NEUMANN (I.), PIETROWICZ (P.), 1985 — *L'agroforesterie à Nyabisindu*. Nyabisindu, PAP, Étude n° 9, 64 p.
- NYAMULINDA (V.), 1989 — Méthodes autochtones de conservation des sols en Préfecture de Ruhengeri. *Bull. Agric. Rwanda*, 3 : 147-158.
- NYAMULINDA (V.), NGIRUWONSANGA (V.), 1992 — Lutte anti-érosive et stratégies paysannes dans les montagnes du Rwanda. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 71 - 82.
- PIERI (C.), 1989 — *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, Cirad, 444 p.
- RISHIRUMUHIRWA (T.), 1992 — Ruissellement et érosion sous bananier au Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 83-93.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la GCES, nouvelle stratégie de lutte antiérosive. *Bulletin Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), GODEFROY (J.), 1967 — « Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie ». Tananarivo, coll. Fertilité des sols tropicaux, 114 : 1405-1409.
- ROOSE (E.), SARRAILH (J.-M.), 1989-1990 — Érodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 7-30.
- ROOSE (E.), NDAYIZIGIYE (F.), NYAMULINDA (V.), BYIRINGIRO (E.), 1988 — La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive pour le Rwanda. *Bull. Agric. Rwanda*, 21 (4) : 264-277.
- ROOSE (E.), NDAYIZIGIYE (F.), SEKAYANGE (L.), NSENGIMANA (J.), 1992 — La GCES, une nouvelle stratégie pour l'intensification de la productivité et la restauration de l'environnement en montagne. *Bull. Réseau Érosion*, 12 : 140-160.
- RUTUNGA (V.), 1992 — *Synthèse des connaissances sur la fertilité des terres et la fertilisation des cultures au Rwanda (1960-1990)*. Kigali, Minagri, projet Pnud/FAO, 122 p.
- SIRVEN (P.), PRIOUL (C.), GOTANÈGRE (J.-F.), 1974 — *Géographie du Rwanda*. Kigali, Éditions Rwandaises, 175 p.

- TEMPLE (P. H.), RAPP (A.), 1972 — « Landslides in the Mgeta area, Western Uluguru mountains, Tanzania ». In Rapp (A.), Berry (L.), Temple (P.), éd. : *Studies of erosion and sedimentation in Tanzania*, Uppsala, *Geografiska Annaler*, 54 (4) : 105-379.
- TONDEUR (G.), 1950 — *Érosion spécialement au Congo belge* (troisième édition). Bruxelles, ministère des Colonies, 240 p.
- WASSMER (P.), 1981 — *Recherches géomorphologiques au Rwanda. L'érosion des sols et ses conséquences dans la préfecture de Kiboye*. Thèse, univ. Strasbourg.
- YAMOAH (C. F.), AGBOOLA (A. A.), MULONGOY (K.), 1986 — Nutrient contribution and maize performance in alley cropping systems. *Agroforestry systems*, 4 : 247-254.

Érosion des terres cultivées et propositions de gestion conservatoire des sols en pays bamiléké (Ouest-Cameroun)

Jean-Marie FOTSING

*Maison de la Télédétection, laboratoire Orstom,
500, rue J.-F.-Breton, 34093 Montpellier, France.*

RÉSUMÉ

Les zones densément peuplées et intensément cultivées des hauts plateaux bamiléqués présentent peu de signes d'érosion et de dégradation. Les techniques traditionnelles d'exploitation des terres sont relativement efficaces du point de vue du maintien de la fertilité des terres et de la lutte antiérosive. Cependant, les transformations en cours dans la région aboutissent, d'une part, à la simplification des aménagements dans les zones anciennement occupées et, d'autre part, à l'extensification des méthodes d'exploitation du sol dans les zones récemment mises en valeur, en dépit de l'apparition d'un néobocage défensif dans les zones d'élevage. De la sorte, les précipitations, pourtant relativement peu agressives, ont de plus en plus tendance à générer un ruissellement concentré menaçant les terres agricoles situées sur des terrains pentus. Les solutions gouvernementales proposées dans le cadre du Projet de développement rural de la province de l'Ouest (PDRPO), largement financé, ne transforment que partiellement les structures et techniques en vigueur. Cet échec, imputable à une inadéquation entre les aménagements proposés et les logiques paysannes, nous conduit à envisager des solutions essentiellement fondées sur les savoir-faire locaux. Bien appliquées, ces propositions pourraient mettre un terme à la dégradation de ce milieu aux potentialités agricoles immenses.

MOTS CLÉS : Érosion — Pression démographique — Dégradation des sols — Ruissellement — Polyculture intensive — Fertilité — Aménagements traditionnels — Billonnage — Bocage.

ABSTRACT

EROSION OF CULTIVATED LANDS AND SOME RECOMMENDATIONS FOR SOIL CROP MANAGEMENT IN THE BAMILEKE COUNTRY (WESTERN CAMEROON)

The highland plateau in the Bamileke region has fertile soils and high, but less aggressive rainfall. The increase in the population growth has led to the occupation of the central part of the region with rural densities of above 500 inhabitants per square kilometre. The traditional system of land exploitation based on the association of crops cultivation and breeding of small animals (goats, sheeps, pigs and poultry) has contributed to the setting up of an enclosure landscape with mixed crops and regular alternation between cultivated land and livestock spaces. This system was relatively efficient in preventing erosion and maintaining the fertility of the lands. Mountains, large and swampy valleys, as well as the chiefdom's traditional reserves lands were essentially put aside for livestock rearing. For quite some time, slow but progressive human installation has taken place on unoccupied lands while great transformations are going on in the former settle zones. Due to the increase in the population growth and the constant quest of cultivated lands, fences around the houses are progressively destroy and abandon. This lead to an intensive water flow around the compounds and on the street's sides. On the other hand, new settled areas are cultivated without any precaution. Therefore the risk of runoff and rapid destruction of land increases all over the region. To face these

difficulties, government through the Western Province Development Project (PDRPO) tries unsuccessfully to introduce new methods of fighting against erosion. The failure of this project makes us to base our propositions on local practices well known by the farmers. Well applied, these measures can save the damage of the natural agricultural capacities of this region.

KEYWORDS : Erosion — Demographic pressure — Intensive agriculture — Rill development — Runoff — Fertility — Traditional fitting up.

RESUMEN

EROSIÓN DE LAS TIERRAS CULTIVADAS Y PROPOSICIONES DE GESTIÓN DE LOS SUELOS EN EL ÁREA BAMILEKE (CAMERÚN)

Las zonas densamente pobladas y intensamente cultivadas de las mesetas bamileke presentan pocas muestras de erosión y de degradación. Las técnicas tradicionales de explotación de las tierras son relativamente eficaces en lo que concierne a la conservación de la fertilidad de las tierras y a la lucha contra la erosión. Sin embargo, las transformaciones que se están efectuando en la región conducen por una parte, a la simplificación de las instalaciones en las zonas antiguamente ocupadas y por otra parte, a la extensión de los métodos de explotación del suelo en las zonas recientemente beneficiadas, a pesar de un neoboscaje de protección en las zonas de crianza. Así, las precipitaciones que son relativamente poco agresivas tienden cada vez más a producir una arroyada concentrada que amenaza las tierras agrícolas situadas en suelos inclinados. Las soluciones gubernamentales propuestas en el marco del Proyecto de Desarrollo Rural de la Provincia del Oeste (PDRPO) — ampliamente financiado — transforman sólo parcialmente las estructuras y técnicas vigentes. Ese fracaso — que se atribuye a una inadecuación entre las instalaciones propuestas y las lógicas campesinas — nos conduce a considerar unas soluciones esencialmente fundadas en los conocimientos locales. Si se aplican bien esas proposiciones, podrían poner punto final a la degradación de ese medio con inmensas potencialidades agrícolas.

PALABRAS CLAVES : Erosión — Presión demográfica — Degradación de los suelos — Arroyada — Policultivo intensivo — Fertilidad — Instalaciones tradicionales — Alomado — Boscaje.

INTRODUCTION

Le pays bamiléké s'étend sur la frange méridionale des hautes terres de l'Ouest-Cameroun, entre les 5° et 6° degrés de latitude nord, sur une superficie d'environ 6 200 km² (fig. 1). Au recensement de 1987, il rassemble un peu plus d'un million d'habitants, soit près de 10 % de la population du Cameroun, sur moins de 2 % de la superficie du pays. Sa densité moyenne de 168 habitants au kilomètre carré le situe largement au-dessus de la moyenne nationale (22 habitants au kilomètre carré) et de loin au premier rang des régions de forte pression démographique. Les autres foyers de forte densité, sur des superficies pourtant plus réduites, sont les monts Mandara et le pays éton, avec moins de 120 habitants au kilomètre carré. La forte population et les exigences socio-économiques modernes entraînent, depuis une trentaine d'années, une évolution rapide des modes d'exploitation du sol et une transformation quasi radicale des systèmes agraires traditionnels.

Ces mutations s'accompagnent du déclin du petit élevage ovin-caprin, de l'émiettement des patrimoines fonciers familiaux et de la désintégration des structures sociales traditionnelles. Le système de bocage, sans être

définitivement abandonné, est fortement compromis malgré l'apparition d'un « néo-bocage » dans les zones montagneuses récemment colonisées. Ainsi s'opère une restructuration des systèmes agraires et des paysages ruraux, par conquête des terres périphériques, développement des cultures de spéculation les plus « rentables » et simplification des aménagements.

Un peu partout, on assiste à une désaffection vis-à-vis des clôtures ou à leur disparition progressive des parcelles cultivées, au raccourcissement de la durée de la jachère, voire à son abandon, à la mise en culture des sommets de colline et des pentes très fortes, ainsi qu'à la prolifération des résidences secondaires... Il en résulte, dans les zones anciennement peuplées, une densification de l'occupation des terres, une baisse de la fertilité et surtout une menace sérieuse d'érosion pour les terres agricoles situées sur les terrains pentus. Pourtant, des techniques traditionnelles relativement efficaces ont permis jusqu'ici d'exploiter de manière ininterrompue les mêmes terrains de culture, d'assurer l'alimentation de dix personnes en moyenne par hectare cultivé, et d'exporter des denrées alimentaires vers les grandes villes (DONGMO, 1981).

Devant la menace de dégradation de la fertilité des sols et de leur érosion, d'une part, et, d'autre part, les pressions démographique et socio-économique, de nouvelles stratégies de gestion des ressources voient le jour. Chez les paysans, il s'agit essentiellement d'initiatives individuelles plus ou moins spontanées, s'inscrivant dans la double logique de diversification et d'intensification, et visant avant tout un accroissement de la production agricole. Pour les pouvoirs publics, qui agissent par le biais des organismes d'intervention en milieu rural, les solutions proposées se situent au triple niveau de la diversification (introduction et vulgarisation des cultures nouvelles), de l'intensification (généralisation de l'utilisation des engrais chimiques) et de la lutte antiérosive (aménagement des versants à forte pente et reboisement). Ces trois points constituent l'essentiel du programme du PDRPO (Projet de développement rural de la province de l'Ouest), cofinancé par le gouvernement camerounais, la Banque mondiale, le Fida et l'Union centrale des coopératives agricoles de l'Ouest (Uccao).

Les deux logiques n'ont rien de contradictoire en apparence. Cependant, on constate que, en dépit des mesures préconisées, les problèmes de maintien de la fertilité et d'érosion des sols sont loin d'être résolus. Dans certains secteurs, ils tendent même à s'amplifier et risquent, à plus ou moins longue échéance, de compromettre les équilibres acquis.

Après un diagnostic rapide des contraintes naturelles de mise en valeur, suivi d'une analyse des techniques et aménagements traditionnels, nous proposerons quelques solutions pour un réaménagement plus équilibré de l'espace agraire bamiléké. Nos propositions puisent largement dans les acquis du savoir-faire paysan, patiemment élaboré au cours des temps. Cette manière de procéder, notons-le, s'inscrit dans la démarche de la GCES (gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols) (ROOSE, 1989, 1994).

DIVERSITÉ DES MILIEUX NATURELS

Une topographie contrastée où dominent les pentes fortes

Les hautes terres du pays bamiléké, d'une altitude moyenne de 1 450 m, sont constituées de plaines, de plateaux et de montagnes. Elles s'articulent en six composantes orographiques majeures, qui se succèdent de 700 à 2 740 m d'altitude (fig. 1) :

— le plateau granito-gneissique, vers le sud (1 200-1 400 m), est caractérisé par des reliefs polyconvexes où affluent par endroits des boules ou des chaos de blocs de granite ;

— le plateau basaltique, vers le nord (1 400-1 600 m), offre une topographie plus calme, avec des interfluvés en croupes surbaissées, arrondies ou allongées ;

— la plaine du Noun longe la bordure orientale du plateau (900-1 100 m) et assure une liaison en pentes douces avec le plateau bamoun ;

— la plaine des Mbos, au sud-ouest (700-800 m), est séparée de l'ensemble par un gigantesque escarpement de plus de 700 m de dénivelée ;

— des montagnes modestes s'élèvent jusqu'à 2 100 m vers le sud et le sud-ouest : Bani (1 921 m), Fotouni (1 755 m), Batié-Bangou (1 889 m), Badenkop (1 924 m) et Bana-Batcha (2 097 m) ;

— au nord-ouest, le massif volcanique des Bamboutos domine de plus de 2 700 m d'altitude l'ensemble du plateau auquel il se raccorde par des gradins successifs parfois subverticaux.

Dans ce milieu montagneux (67 % des superficies sont situées au-dessus de 1 040 m d'altitude), les pentes supérieures à 25 % occupent 51 % des surfaces, contre 20 % pour les pentes comprises entre 12 et 25 %, et 29 % pour les pentes inférieures à 12 % (VALET, 1985).

Un climat d'altitude aux précipitations peu agressives

Le climat est de type subéquatorial de mousson à dominante humide et fraîche, fortement diversifié par l'orientation des pentes et l'altitude (SUCHEL, 1987). Il est caractérisé par des totaux annuels de précipitations élevés (1 500 à 2 500 mm) (fig. 1), pluies qui sont concentrées en une seule saison de mars à novembre. Les hauteurs maximales sont enregistrées en août-septembre mais les intensités horaires sont faibles (15 à 40 mm/h). Dschang et Bafoussam enregistrent respectivement une moyenne annuelle de 7,0 et 2,1 précipitations journalières de 50 mm et plus. Ces quantités sont négligeables comparées à celles de Kribi (13,8) ou de Douala (22,1).

Les intensités journalières les plus fortes concernent les secteurs au vent de la mousson qui bénéficient d'un régime pluviométrique à paroxysme marqué. Elles restent cependant modestes : Dschang avec 9,9 mm par jour détient le minimum d'intensité journalière des pluies au Cameroun (MORIN, 1989). En outre, même si le nombre annuel de jours pluvieux est proche de 200, les pluies, sauf rares exceptions, sont sans grande brutalité (SUCHEL, 1987). Pendant la saison sèche, les pluies occasionnelles ne sont pas rares. Sécheresse toute relative d'ailleurs puisque, au-dessus de 1 000 m d'altitude, les maxima annuels de température sont inférieurs à 22 °C. Le taux d'humidité relative de l'air est partout élevé et quasi constant toute l'année.

Le sud du pays bamiléké échappe à cette ambiance climatique fort agréable. On y enregistre à la fois des excès et des déficits pluviométriques (Bangangeté et Bakou reçoivent respectivement 1 450 et 2 500 mm de pluie par an ; ils sont pourtant situés à peu près à la même latitude : 4°02' et 4°04'). Cette région subit également les violents orages liés aux lignes de grains de début de saison des pluies (TSALEFAC, 1983).

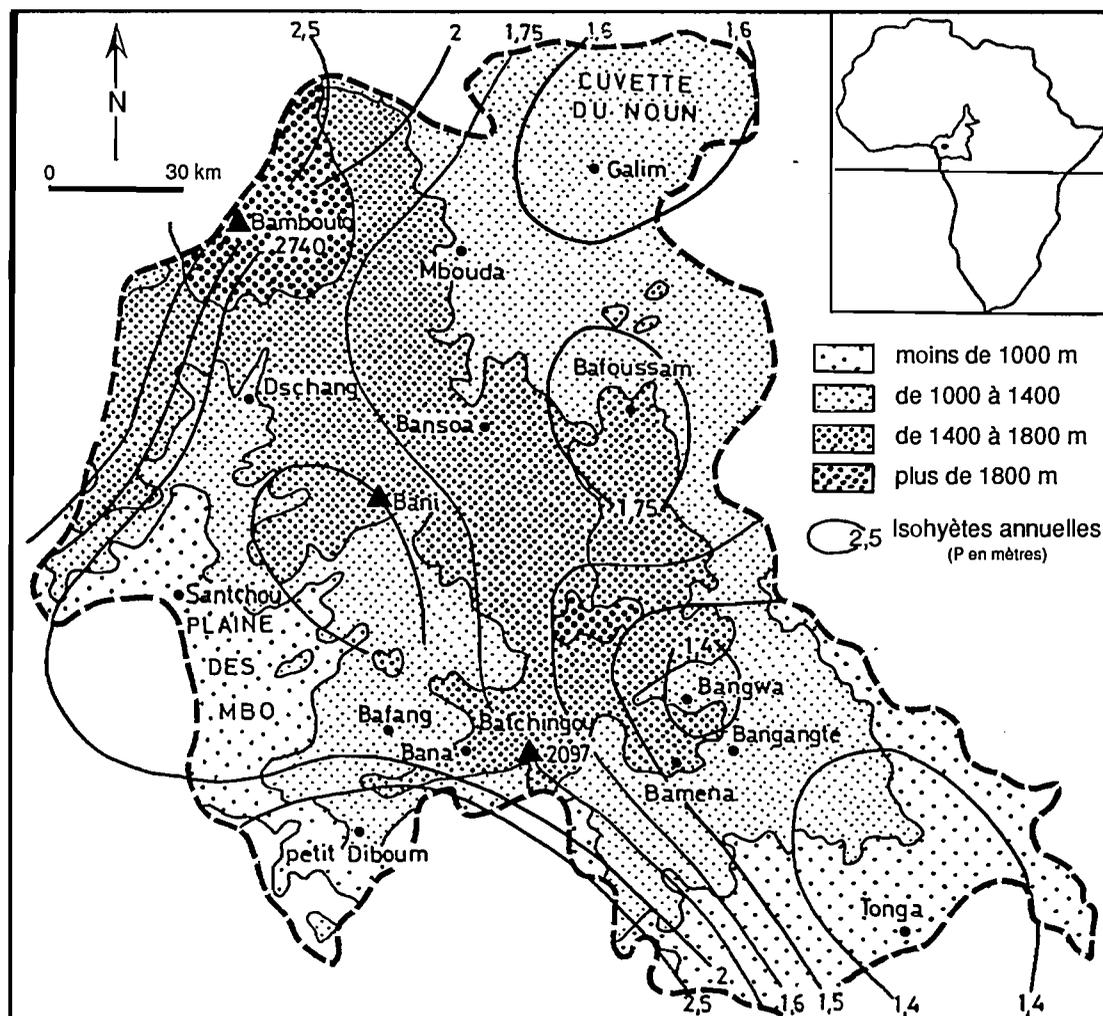


FIG. 1. — Relief et distribution spatiale de la pluviosité (d'après SUCHÉL, 1989).
Relief and space distribution of rainfalls (after SUCHÉL, 1989).

Des sols fertiles à l'origine mais vulnérables après culture

Les sols du plateau bamiléké peuvent être classés en trois grands groupes (SEGALEN, 1967 ; CHAMPAUD, 1973).

Les sols ferrallitiques, développés sur socle ancien et sur couvertures volcaniques, sont subdivisés en sous-groupes suivant la nature de la roche mère. Ceux dérivés de basaltes sont plus répandus et présentent des propriétés physiques et hydriques très favorables (grande épaisseur, porosité élevée, friabilité et absence de cailloux, forte teneur en argile et perméabilité de surface). Les sols ferrallitiques remaniés ou typiques sur gneiss ont une fertilité variable, suivant l'épaisseur et la profondeur de l'horizon caillouteux. Les sols ferrallitiques indurés, issus de basal-

tes, gneiss ou granites, sont peu étendus et portent par endroits des affleurements de cuirasse.

Les sols peu évolués proviennent essentiellement de roches volcaniques meubles basiques (cendres, lapillis). D'une extrême perméabilité, ils sont très riches en matières organiques, azote et bases échangeables.

Les sols hydromorphes des fonds marécageux (sableux et carencés sur granite, tourbeux sur basalte et alluvions) sont relativement peu fertiles. Mais la présence d'eau, la planéité et les teneurs élevées en matières organiques en font de bonnes terres agricoles.

D'une manière générale, les sols présentent des taux de limon de 10 à 30 % contre 10 à 70 % d'argile. Partout s'observent des nuances locales suivant la position sur les toposéquences. L'épaisseur, la fertilité et l'absence d'élé-

ments grossiers augmentent des parties supérieures vers les parties inférieures des versants. Ces particularités locales sont mises en évidence dans l'exploitation des terroirs et l'aménagement de l'espace.

Une forte pression démographique

Région d'occupation humaine ancienne et continue, le pays bamiléké a, en 1987, une densité moyenne de 168 habitants au kilomètre carré. À l'échelle régionale, les densités varient de 31 à 405 habitants au kilomètre carré. Cependant, de grandes différences opposent le nord essen-

tiellement basaltique au sud granitique, d'une part, et les régions centrales aux régions périphériques, d'autre part. À l'échelle des chefferies, les densités sur basalte sont partout supérieures à 200 habitants au kilomètre carré, et dans certains secteurs elles avoisinent et dépassent localement 1 000 habitants au kilomètre carré (DUCRET et FOTSING, 1987). Dans le centre du plateau, les densités ne tombent presque jamais au-dessous de 100 habitants au kilomètre carré. À partir de là, elles décroissent soit progressivement, soit de manière plus tranchée vers la périphérie (fig. 2).

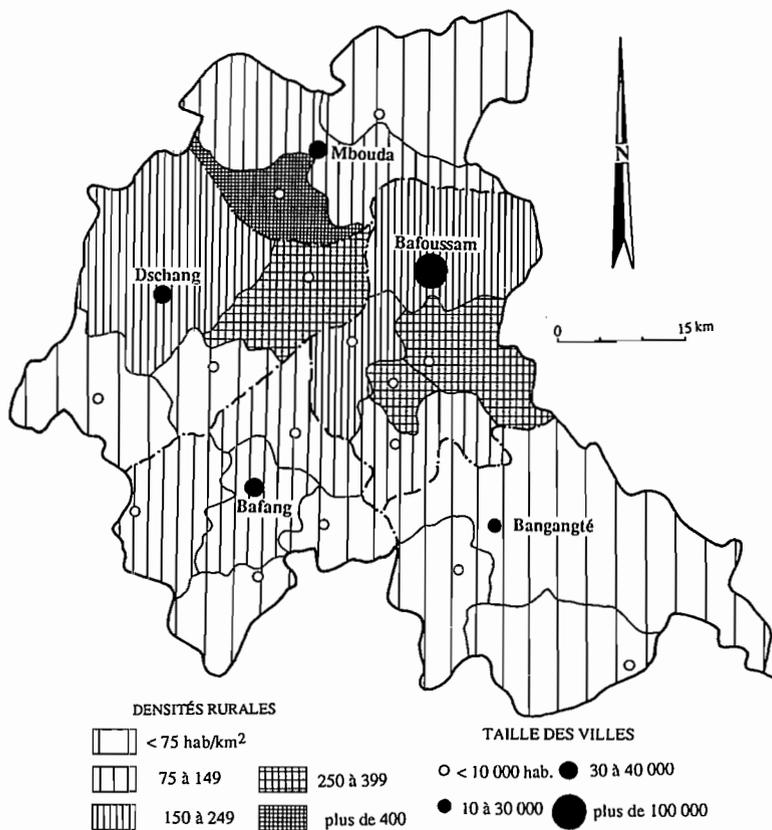


FIG. 2. — Répartition spatiale de la population (d'après le recensement de 1987).
Population distribution (from the 1987 census).

Ces fortes densités prennent toute leur signification dans le double contexte d'habitat dispersé et d'héritage foncier unisélectif. En effet, à la mort d'un chef de famille, la totalité du patrimoine foncier familial est léguée à un seul successeur mâle. Les fils non héritiers doivent s'installer ailleurs. Avec un taux annuel de croissance démographique de 3,4 % (entre 1976 et 1987), les exigences en terres agricoles sont toujours plus importantes. Malgré un exode massif vers les grandes villes, cette pression est toujours plus accentuée par le développement des résidences secondaires et quelques timides migrations de retour.

EXPLOITATION DES TERRES ET AMÉNAGEMENTS TRADITIONNELS

L'exploitation traditionnelle des terres est caractérisée par l'association et (ou) la juxtaposition de l'agriculture et de l'élevage. C'est un système agraire complexe, où les aménagements ruraux varient selon la prédominance d'une activité sur l'autre, l'existence ou non d'établissements humains permanents et, surtout, l'importance de la pression démographique. On y distingue les systèmes à dominante culturelle des zones de résidence permanente et les systèmes à dominante pastorale des massifs montagneux

quelque peu marginalisés. Traditionnellement, les femmes s'occupent des cultures vivrières et les hommes des cultures pérennes et de l'élevage.

Exploitation des zones habitées

L'AGROFORESTERIE TRADITIONNELLE

Traditionnellement, les zones de résidence permanente se limitent aux plateaux, dont les terres ont été sollicitées en priorité lors de l'attribution des parcelles (les montagnes et les plaines marécageuses ayant été délaissées). Ici,

le relief vallonné offre aux paysans la possibilité de disposer des trois unités topographiques indispensables à l'autonomie de leur famille : bas-fond pour la raphiale, versant pour les cultures et sommet pour l'élevage. Les unités d'exploitation familiale (moins de 3 ha en moyenne), allongées sur le flanc des collines, associent une gamme variée de plantes, depuis la vallée jusqu'au sommet d'interfluve. C'est le domaine d'une agriculture plus ou moins intensive associée au petit élevage dans un paysage de bocage caractéristique des différentes zones agrogéologiques (fig. 3 et 4).

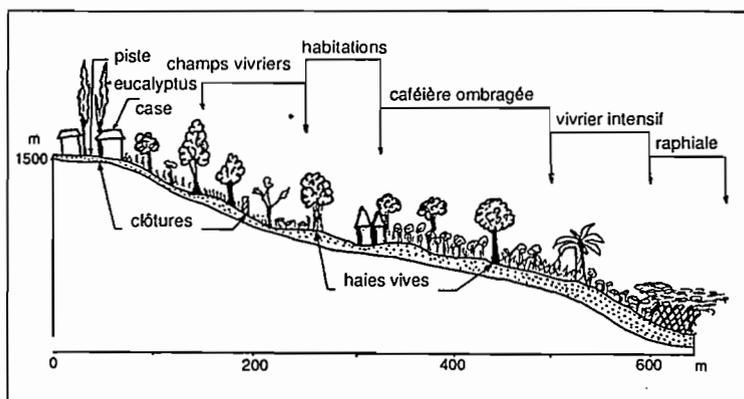


FIG. 3. — Profil paysager sur le plateau basaltique.
Landscape profile on the basaltic plateau.

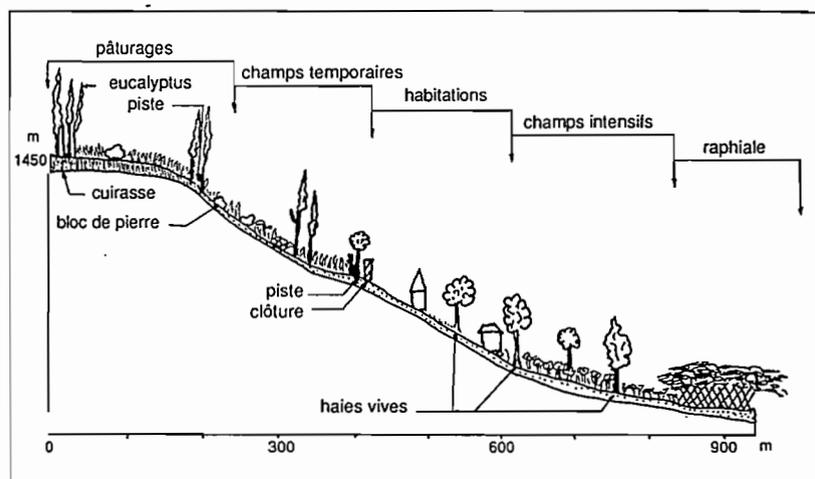


FIG. 4. — Profil paysager sur le plateau granitique.
Landscape profile on the granitic plateau.

Les bas-fonds portent des peuplements de palmier raphia, *Raphia farinifera*, à la lisière desquels s'étendent de petites parcelles de tubercules (macabo, taro, igname, manioc...), associées à quelques bananiers, légumes divers et arbres fruitiers.

Les versants portent les champs multiétagés aux associations culturales complexes. L'omniprésence des arbres (150 à 180 pieds à l'hectare) et des arbustes (environ 250 pieds à l'hectare) renforce l'occupation des terres et donne aux paysages un aspect forestier. Les caféières

(1 600 à 2 000 pieds à l'hectare) et les champs vivriers intensifs y côtoient et (ou) enserrent des unités d'habitation de trois à dix cases. Sur les parcelles cultivées, maïs, arachide, macabo, manioc, taro, igname, patate douce, haricot, légumes, bananiers (plantain et doux), condiments divers, etc., s'associent en proportion variable aux caféiers et aux arbres forestiers ou fruitiers (papayers, goyaviers, safoutiers, manguiers, orangers, citronniers, colatiers, canariums, avocatiers et palmiers à huile dans le Sud). Dans

cet espace « saturé », on trouve toujours une place pour aménager l'enclos à porcs, à proximité des cases.

Les parties supérieures des versants portent soit des pâturages pour les moutons et les chèvres, soit des champs temporaires cultivés avec jachère, ou encore des champs vivriers permanents, où l'arachide est associée au maïs, au haricot, à l'igname, au vouanzou... Sur les sommets de colline des zones faiblement peuplées, l'usage du feu pour les défrichements est fréquent (planche 1).



PLANCHE 1. — Le bocage bamiléké au sud de Bafoussam (chefferie Baham).
Cliché IGN n° 047 au 1/10 000 de la mission AE-175-100 réalisée en 1960.

Cette photographie montre la double physionomie du bocage bamiléké organisé à partir des forêts galeries de palmiers raphia :

- au nord et à l'ouest, un réseau dense et continu de haies vives quadrille la quasi-totalité des interfluves découpés en petites parcelles et piquetés d'arbres (mise en valeur ancienne et intensive) ;
- au sud et à l'est, un bocage lâche à proximité des raphiales isole de grandes parcelles presque nues sur lesquelles affleure par endroits la roche (mise en valeur récente et peu intensive).

LES TECHNIQUES DE FERTILISATION ET DE LUTTE ANTIÉROSIVE

Les techniques de maintien de la fertilité des sols

Elles sont multiples.

La pratique de la jachère sous plusieurs formes (jachère d'intersaison culturale, jachère annuelle ou pluriannuelle)

permet la reconstitution naturelle des pertes du sol. Sa durée est en rapport avec l'intensification de la culture. La jachère pluriannuelle concerne surtout les champs éloignés des zones de résidence permanente et les champs d'arachide des sommets de colline cultivés tous les deux ou trois ans. À proximité

des cases, c'est surtout une jachère annuelle ou, plus fréquemment, une jachère d'intersaison car seules quelques parcelles (environ 20 %) sont cultivées lors de la seconde campagne culturale (d'août à décembre).

Dans le contexte de l'intégration de l'agriculture et de l'élevage, les parcelles récoltées et les jachères servent de pâturage pour le petit bétail. Les déplacements fréquents de l'enclos à porcs assurent la fertilisation des abords des habitations. Le fumier ramassé sur les aires de stationnement du bétail est répandu sur les parcelles cultivées.

Le recyclage de la biomasse fait appel à des techniques minutieuses, notamment l'alternance régulière des billons et des sillons. Les sillons reçoivent la totalité des déchets domestiques, des cendres et de tous les résidus pouvant enrichir le sol. Au moment de la préparation des champs, cette fertilisation organique est complétée par les résidus végétaux présents sur les parcelles, puis recouverte de terre arrachée de part et d'autre du sillon, par destruction des billons de la précédente saison culturale. Ainsi, les nouveaux billons sont systématiquement édifiés à l'emplacement d'anciens sillons et vice versa.

La pratique de l'écobuage consiste à réunir en tas les herbes et les produits végétaux des défrichements, à les recouvrir de terre, à aménager au-dessus une ou plusieurs cheminées et à y mettre le feu. Les cendres, protégées des vents et des eaux de pluie, enrichiront ces parcelles réservées aux cultures exigeantes.

Les aménagements antiérosifs

La confection des billons obéit aux contraintes de pente et varie selon la position topographique, les types de cultures, l'épaisseur et la capacité de stockage des sols.

Sur les terrains pentus, les gros billons (environ 3 à 7 m de longueur, 40 à 90 cm d'embase et 15 à 50 cm de hauteur) sont orientés dans le sens de la plus grande pente

et disposés en quinconce du haut vers le bas du versant. On les édifie de préférence sur les sols épais des bas de versant, où ils peuvent parfois prendre l'aspect de planches surélevées. Ils sont réservés aux tubercules et aux associations culturales complexes.

Sur les pentes faibles, les billons sont disposés en damier, avec cependant une préférence pour les billons parallèles aux courbes de niveau. Leur longueur est quelquefois imposée par la taille de la parcelle ; ils peuvent alors s'étendre d'un bout à l'autre de la parcelle cultivée (longueur : 10 à 15 m ; épaisseur : 40 à 70 cm ; hauteur : 30 à 40 cm). Les petits billons sont généralement construits sur les sols gravillonnaires des sommets de colline, réservés aux champs d'arachide à associations limitées.

Sur les pentes moyennes, les deux types de disposition se côtoient. Il est alors fréquent de trouver sur la même exploitation des parcelles à billons aménagés dans le sens de la pente et des parcelles à billons perpendiculaires à celle-ci.

En matière d'édification et d'entretien des clôtures, le bocage est l'élément marquant de l'aménagement des espaces habités. Étroitement lié au régime foncier et à l'association de l'élevage à la culture, il est constitué de « haies juridiques » et de « haies-enclos », dont l'agencement délimite des chemins de circulation qui canalisent le bétail, des abords des cases aux pâturages communs des sommets. Ces clôtures, horizontalement renforcées de nervures de raphia (fig. 5), sont surtout constituées d'essences à croissance rapide et reproductibles par bouturage (*Ficus* spp., *Markhamia lutea*, *Polyscias fulva*, *Harungana madagascarensis*, *Podocarpus milanjanus*, *Dracaena arborea*, *Hymenodycton floribundum*, *Datura stramonium*, *Vernonia* sp....). Régulièrement entretenues, elles fournissent des tuteurs pour les cultures grimpanes, le bois de chauffe et servent secondairement de fourrage.

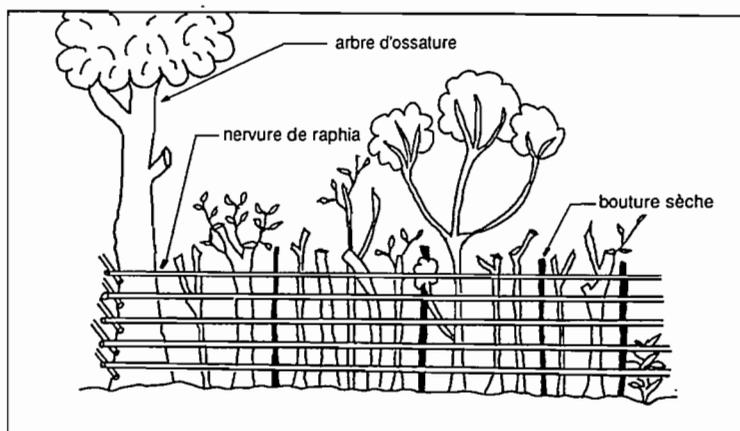


FIG. 5. — La haie vive traditionnelle.
Traditional quickset hedge.

EFFICACITÉ RELATIVE DES AMÉNAGEMENTS TRADITIONNELS

Les aménagements agraires traditionnels exercent une influence décisive sur le ruissellement et l'érosion des sols.

Les haies vives, surtout celles disposées perpendiculairement à la pente, freinent la course des eaux, piègent les transports solides, brisent la force des vents, ralentissent la chute des gouttes de pluie, fixent les abords des chemins de circulation entre les clôtures et créent un microclimat autour des habitations. Leur litière protège le sol des gouttes de pluie et freine l'érosion.

Le mélange des cultures sur le même billon et l'association des arbres aux parcelles cultivées permettent une exploitation rationnelle du sol, une production variée, freinent la croissance des adventices, assurent aux plantes cultivées une meilleure utilisation de la lumière, fixent les billons et renforcent la résistance des sols à l'érosion. Ainsi, ils permettent de cultiver les pentes fortes. En début de culture, les plantes pérennes fixent les sols et les protègent des premières pluies.

Le maintien des résidus de récolte sur les billons pendant la saison sèche protège le sol de l'ensoleillement direct, du vent et des pluies occasionnelles. Les déchets et résidus entreposés dans les sillons réduisent le ruissellement et diminuent sa force érosive.

La technique de confection des billons qui consiste à remuer la terre du haut vers le bas du versant, à reculons, freine le déplacement incontrôlé des particules de sol. La disposition en quinconce augmente l'infiltration, canalise les eaux de pluie, inhibe le ruissellement et freine sa vitesse. Elle est bien adaptée aux régions basaltiques, où la faible longueur des versants, couplée à la forte capacité d'infiltration, ne permet ni une concentration des eaux de pluie, ni une grande vitesse d'écoulement superficiel. En revanche, elle ne convient pas aux régions de forte pente, où la déclivité s'étend sur de longues distances et où l'infiltration est plus faible (massifs montagneux volcaniques et collines granitiques). Quoi qu'il en soit, le billonnage du sol est indispensable dans le système traditionnel de jardins multiétagés et de mélange des cultures.

Transformations récentes et colonisation des terres marginales

Le système agraire traditionnel bamiléké s'est enrichi de trois éléments d'intensification et de diversification : la sylviculture de l'eucalyptus, les élevages spécialisés (élevage hors sol de porcs, de lapins ou de volailles) et le maraîchage, souvent irrigué. Ces nouveaux éléments s'accompagnent d'une transformation quasi radicale des systèmes agraires et d'une simplification des aménagements.

ÉVOLUTION DES SYSTÈMES AGRAIRES INTENSIFS

Dans les zones d'agriculture intensive, les transformations en cours provoquent la saturation de l'espace rural. Les exploitations familiales déjà très petites se fraction-

nent sous la forte poussée démographique et la « faim de terre ». Même si, en principe, la totalité du patrimoine foncier est confiée à l'héritier unique, en réalité, les exploitations familiales se morcellent à chaque changement de mains : on installe les fils ou les frères non héritiers sur les parties supérieures des concessions ; on octroie aux émigrés des parcelles pour la construction de leur résidence secondaire...

L'augmentation du nombre de cases et de l'indice de morcellement est significative de cette saturation de l'espace. Entre 1964 et 1987, la densité du bâti est passée de 2,2 à 3,3 cases à l'hectare dans les quartiers du plateau basaltique de Bafou ; la densité des haies de 124 à 157 m/ha et l'indice de morcellement de 186,4 à 224,3 m/ha. Le taux d'accroissement annuel des constructions se situe autour de 3 % entre 1985 et 1990. Le rythme de saturation de l'espace est moins accéléré sur le plateau granitique, longtemps soumis à une émigration plus intense. La pression du bâti y est passée de 0,13 à 0,82 case à l'hectare, l'indice de morcellement de 100,3 à 135,7 m/ha et la densité des haies vives de 34 à 41 m/ha. Le taux d'accroissement annuel des cases est de 1,5 % (DUCRET et FOTSING, 1987).

Sur des exploitations de plus en plus réduites (1,3 ha en moyenne), toutes les combinaisons sont désormais possibles entre caféiculture, élevage, maraîchage et sylviculture, mais les cultures vivrières sont toujours présentes. La généralisation du maraîchage entraîne une simplification des haies et une réduction des boisements. La jachère tend à disparaître et l'utilisation des engrais minéraux se généralise à l'ensemble des cultures. Le développement des élevages hors sol met à la disposition de l'agriculture des fertilisants organiques, notamment les fientes de poule, très recherchés pour le maraîchage. L'adoption de nouvelles variétés culturales comme le soja, le maïs « Z 230 » et la pomme de terre « cardinal » confirme la tendance à la diversification.

La création des boisements privés d'eucalyptus et l'extension des concessions vers les sommets de colline entraînent la disparition des pâturages et imposent l'utilisation des piquets pour l'élevage des moutons et des chèvres. Les clôtures intérieures disparaissent tandis que les « haies juridiques » ne sont guère entretenues.

EXPLOITATION DES TERRES « MARGINALES » ET PÉRIPHÉRIQUES

Les fortes pentes, les zones marécageuses ou hydromorphes, les massifs montagneux et les rives du Noun, longtemps en marge des aménagements traditionnels, sont depuis une vingtaine d'années le théâtre d'une colonisation agricole intense et anarchique.

Dans les zones pastorales des massifs montagneux, le fil de fer barbelé et l'eucalyptus ne laissent à l'élevage que des terrains pentus de valeur agricole nulle. Dans les Bamboutos, en moins de cinq ans, plus du tiers des sur-

faces pastorales sont passées aux mains des cultivateurs (FOTSING, 1989). La situation est analogue dans les périmètres forestiers « protégés » de la réserve de Santchou, au sud-ouest, où seules les pentes fortes limitent la progression des défrichements.

Les parcours encore disponibles, voués au pâturage, sont désormais gérés suivant des stratégies cycliques, articulées sur une transhumance de saison sèche, qui valorise les résidus de récolte et les prairies humides des zones hydromorphes non aménagées du plateau. Les feux de fin de saison sèche sont largement pratiqués pour accélérer le recru fourrager sur les pâturages à proximité des campements (FOTSING, 1990).

Sur les terres récemment mises en culture, les techniques d'exploitation du sol sont très sommaires, les aménagements qui les accompagnent aussi. Les associations culturales sont simplifiées à l'extrême ou relèvent du domaine des exceptions. On y pratique de préférence les cultures maraîchères (pomme de terre, oignon, ail, carotte...) ou les cultures vivrières de rapport immédiat (maïs, haricot...), qui ne couvrent que très faiblement le sol. L'usage du feu pour les défrichements est fréquent. Le paysage offre une physionomie d'*openfield*, parsemé, de loin en loin, de quelques rares arbres fruitiers. Les seuls boisements présents dans ces zones sont ceux des haies pionnières d'eucalyptus. Cependant, leur intérêt antiérosif est négligeable car elles sont situées sur les têtes de vallon et sur les replats, où les risques d'érosion sont peu évidents.

DIAGNOSTIC DES RISQUES ET PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION

Le bilan actuel que l'on peut dresser sur la gestion des ressources et sur les aménagements traditionnels du pays bamiléké soulève des inquiétudes pour deux raisons principales. D'une part, l'érosion pluviale menace de plus en plus les terres agricoles (le traitement des mesures de l'agressivité des pluies montre que le climat présente une érosivité importante : $800 \leq R_{USA} \leq 1200$) (FOURNIER, 1993). D'autre part, la surexploitation expose les sols à une rapide dégradation.

Des zones diversement exposées à l'érosion

La pluie est le principal agent d'érosion qui menace, à des degrés divers, les terres agricoles du pays bamiléké. Même si les pluies annuelles sont abondantes, au regard des propriétés physiques et hydriques des sols, les précipitations érosives sont celles qui s'abattent sur des sols peu couverts, avec des intensités de 75 à 120 mm/h. Or les averses de 150 mm/h pendant 15 minutes sont relativement fréquentes (MORIN, 1989). Elles sont liées aux lignes de grains et tombent sur des sols à peu près nus :

en mars-avril (début des cultures), en juin (période de sarclage) et en octobre (après les premières récoltes).

En début de saison humide, les averses sont précédées de puissantes rafales de vent où celui-ci souffle entre 9 et 24 m/s (MORIN, 1989). Leurs grosses gouttes s'abattent sur des sols desséchés, parfois pulvérulents, mal protégés par le couvert végétal brûlé, voire totalement dénudés par les défrichements ou le billonnage préalable aux semilles. En milieu de saison des pluies, ces orages interviennent sur des parcelles sarclées ou partiellement récoltées. Une fois les formations superficielles gorgées d'eau, ils peuvent déclencher des crues brutales, voire des glissements de terrain.

La porosité totale des formations superficielles est très élevée. OLIVRY (1974) estime la perméabilité des sols du pays bamiléké à 7,2 mm/h. Par voie de conséquence, les coefficients de ruissellement sont faibles, celui-ci ne se déclenchant qu'une fois la saturation du sol assurée. Ainsi, pour une pluie de 50 mm, les coefficients varient de 3 à 17 % selon les conditions de pente, de porosité et de saturation des sols. L'infiltration est de 50 à 100 mm/h sur les sols d'origine basaltique et seulement de 9 à 10 mm sur les sols granitiques. La grande profondeur des sols basaltiques et l'épais manteau d'altérites qu'ils recouvrent absorbent la quasi-totalité des eaux de pluie et inhibent le ruissellement. Sur les versants granitiques, la texture sablo-limoneuse et la faible épaisseur des sols autorisent la formation d'une croûte de battance et un ruissellement accru sinon brutal. Toutefois, la faible longueur des versants (800 à 1 500 m) réduit considérablement la vitesse des écoulements superficiels et par conséquent leur capacité érosive. À peine concentré, le ruissellement est annihilé par les bas-fonds ou les marécages.

Dans les zones densément peuplées, la transformation des systèmes agraires accroît les risques d'érosion et de dégradation. L'augmentation du nombre de cases entraîne une accentuation du ruissellement sur les toits et les cours des concessions. Ainsi se développe autour des habitations et sur les bas-côtés des routes, un ruissellement en rigoles, qui s'amplifie à l'exutoire des canalisations et sur les surfaces tassées (cours, pistes et chemins...). Parallèlement à l'augmentation du nombre de cases, on assiste à la disparition des clôtures intérieures. Le développement du réseau des pistes accentue le morcellement de l'espace rural, qui dans certains secteurs supporte des densités de population à la limite du tolérable (plus de 1 200 habitants au kilomètre carré sur le plateau basaltique) (DUCRET et FOTSING, 1987).

En définitive, l'érosion dépend du bombardement pluvial, du splash et de la présence de sols battants, qui favorisent l'apparition du ruissellement. Celui-ci est d'abord pelliculaire, diffus ou en film, puis il s'organise en réseaux serrés de filets d'eau anastomosés et de fines rigoles de quelques centimètres de longueur. Cependant, son effica-

citée est largement tributaire des modes d'exploitation du sol, des aménagements qui les accompagnent ainsi que de la situation topographique.

Bilan de la dégradation des terres

D'une manière générale, l'érosion est souvent considérée comme un problème secondaire et bien maîtrisé par les paysans : le bocage, les cultures associées sur billons perpendiculaires à la pente sont censés avoir un rôle anti-érosif déterminant. Dans le système intensif traditionnel, là où la couverture végétale est conservée, les eaux superficielles sont peu érosives. De la sorte, les sols riches et bien structurés du plateau basaltique, malgré les fortes densités humaines qu'ils supportent, présentent peu de signes d'érosion. Seuls les labours y provoquent une érosion mécanique sèche. Les marques d'érosion dans le paysage sont le plus souvent effacées par l'intensité et la fréquence du travail du sol. Toutefois, les terres de bas de versants concaves, les plus anciennement cultivées, montrent des traces d'appauvrissement, signes évidents de la faiblesse des apports colluviaux et de la forte lixiviation locale.

À l'opposé, les zones de faibles densités de population, les hauts pâturages et toutes les zones de mise en valeur récente, du fait de la précarité de la tenure foncière, sont exposés à une réelle menace de dégradation. Dès que les pentes dépassent 25 %, une érosion linéaire intense est observée. Le surpâturage, les aménagements sommaires et les méthodes expéditives liées à une exploitation du sol de type minier en sont largement responsables.

Les méthodes traditionnelles d'entretien de la fertilité sont de moins en moins possibles, suite à la quasi-disparition du petit élevage et de la jachère. Les paysans recourent de plus en plus aux engrais chimiques. Il s'agit essentiellement des engrais complexes (N 20-P 10-K 10, N 12-P 6-K 20, moins fréquent) et de l'urée (qui a remplacé le sulfate d'ammoniaque). Officiellement destinés aux caféières, ils sont largement détournés vers les cultures vivrières et maraîchères.

Les niveaux de fertilisation sont élevés (250 à 300 kg/ha sur les parcelles maraîchères du piémont de Djuttitsa) mais on constate un excès d'azote et une insuffisance de potasse. DUCRET et GRANGERET (1986) ont trouvé les proportions moyennes de 154 N, 63 P, 54 K pour le café, 147 N, 72 P, 72 K pour les cultures vivrières et 427 N, 218 P, 235 K pour les cultures maraîchères. Compte tenu du pouvoir fixateur des hydroxydes de fer et d'alumine des sols (VALET, 1985), on peut s'attendre aussi à une insuffisance de la disponibilité en phosphore assimilable pour les plantes. Une campagne de diagnostic foliaire menée par l'IRA en 1984-1985 a détecté, outre des carences en oligoéléments et en soufre, une alimentation insuffisante en phosphore. Sur les sols gravillonnaires des sommets de colline, le maïs présente des carences en azote, potasse et phosphore, que les agricultrices attribuent à l'épuisement de

ces sols qui, soumis à un fort drainage, « ne retiennent pas bien les engrais ».

Sur les hauts versants à végétation naturelle conservée, l'érosion hydrique semble modeste. Les eaux de ruissellement roulent sur le tapis herbacé couché, sans causer de dégâts aux sols même sur les fortes pentes. Excepté les ruissellements des premières pluies, qui lèchent les feuilles et les poussières du sol, les lames ruisselées sont claires, ce qui montre bien qu'elles épargnent le sol sous-jacent. Ici prédomine le ruissellement pelliculaire, dont l'action se limite à transporter des argiles et limons, à déchausser la base des touffes de *Hyparrhenia ruffa* ou de *Sporobolus pyramidalis* et à modeler des microcheminées de fées sur les graviers et plaquettes de roches. Quelques sables et graviers peuvent alors être transportés (MORIN, 1989).

Sur les versants à végétation appauvrie se développent un ruissellement linéaire et une érosion intense. Sur les sols exposés par les feux et sur les parcelles préparées pour les semilles, les vents de début de saison des pluies balayent les matériaux fins, dont s'emparent ensuite les eaux de ruissellement. Sur les pâturages extensifs d'altitude, le sol nu ne résiste pas à la battance des gouttes de pluie, qui provoque la désintégration des agrégats superficiels du sol. Cette érosion hydrique aréolaire conduit peu à peu au déchaussement de la base des touffes de chaume et de leurs racines, puis interfère avec le piétinement du bétail qui tasse le sol, pour préparer l'intervention du ruissellement concentré. En quelques averses, on constate une ablation partielle de l'horizon de surface, alors qu'il est déjà peu épais. Ces processus sont accélérés par la convexité qui caractérise les « collines en demi-orange » des zones granitiques.

Dans les zones de colonisation agricole récente, le ruissellement dégrade rapidement les terres cultivées. À Baleng, sur des versants à 25 % de pente, cultivés en billons disposés dans le sens de la pente, OLIVRY (1974) a mesuré une dégradation de 120 t/ha en trois mois de saison des pluies. Cet auteur constate que l'importante dégradation spécifique des bassins versants du Mbam (6 t/ha/an) et de la Mifi (20 t/ha/an) résulte avant tout des influences anthropiques. Il attribue le débit solide élevé du Mbam pendant toute la saison des pluies à l'apport des particules issues de l'entretien des parcelles de cultures vivrières en pays bamiléké. Toutefois, ces chiffres ne sont pas excessifs comparés aux 400 et 700 t/ha/an enregistrées à Abidjan sous forêt, sur une pente de 22 % (ROOSE, 1977).

À l'échelle des parcelles d'érosion, nous ne disposons que de mesures ponctuelles sans grande signification et du reste discutables. À Baranka, par exemple, sur une parcelle nouvellement cultivée de 39 m², aménagée en billons (Hauteur : 30 à 35 cm) modelés dans le sens de la pente (versant de 35-40 %), NGOUFO (1988) a mesuré une érosion de 2,6 t/ha, soit le départ d'une pellicule de sol de 0,9 mm en huit jours de septembre 1986. Ce résultat paraît

excessif compte tenu de la taille de la parcelle, du temps et des conditions de mesure. Quoiqu'il en soit, le surpâturage provoque des glissements de terrain, matérialisés par les cicatrices rouges qui zèbrent les flancs de colline des plans sommitaux. Les écobuages successifs, pratiqués dans la région, ont totalement déstructuré les sols humifères sur trachytes peu cohérents. Au total, la dégradation des sols en pays bamiléké est en relation, d'une part, avec la topographie, la roche mère et le sol et, d'autre part, avec l'intensification du système de culture (FOTSING, 1994).

Quelques tentatives d'amélioration

LES SOLUTIONS CONCERTÉES

Les premières tentatives d'amélioration des systèmes agraires bamiléqués remontent à l'époque coloniale et concernent le billonnage en courbes de niveau (taille, épaisseur et embase des billons à peu près identiques à celles des billons traditionnels). Cette technique, qui comporte des risques certains de ravinement en cas de fortes averses, a été introduite dans la région de Dschang vers 1940, en même temps que l'initiation à l'utilisation des engrais chimiques. Le « succès » de l'opération s'est limité aux alentours immédiats des stations d'expérimentation.

Depuis l'indépendance du Cameroun, cette technique du billonnage isohypse a été largement encouragée par le ministère camerounais de l'Agriculture. Cependant, seuls les maraîchers et quelques jeunes planteurs l'ont adoptée.

Ainsi, un demi-siècle de « vulgarisation » n'a pas suffi pour convaincre tous les cultivateurs d'abandonner les techniques ancestrales. Un peu partout, billons isohypses et billons perpendiculaires se côtoient ; les premiers vers les hauts de versant et les seconds vers le bas. Dans les zones peu touchées par la diversification culturelle, la préférence est aux billons parallèles à la pente. Des enquêtes menées dans le sud du pays bamiléké montrent que seulement 5,5 % des femmes initiées à la pratique du billonnage isohypse l'ont adoptée alors que 85,4 % sont restées attachées aux méthodes traditionnelles (TCHAWA, 1991).

Depuis 1978, le Projet hauts plateaux de l'Ouest (PHPO), relayé en 1984 par le Projet de développement rural de la province de l'Ouest (PDRPO) — dont l'objectif essentiel est d'intensifier l'ensemble des cultures et de promouvoir des techniques propres à prévenir l'érosion des sols et à conserver leur fertilité —, propose trois types d'aménagements antiérosifs orientés dans le sens des courbes de niveau mais variant suivant la déclivité des versants. Il s'agit des haies antiérosives sur des pentes de 15 à 20 % tous les vingt mètres, des billons antiérosifs sur des pentes de 20 à 30 % tous les quinze mètres, en association avec des fossés et des gradins antiérosifs sur des pentes de plus de 30 % tous les treize mètres (fig. 6). À ces aménagements s'ajoute le reboisement par *Eucalyptus saligna*, sur des secteurs pentus « impropres » à la mise en valeur agricole et classés ensuite comme « réserves forestières ».

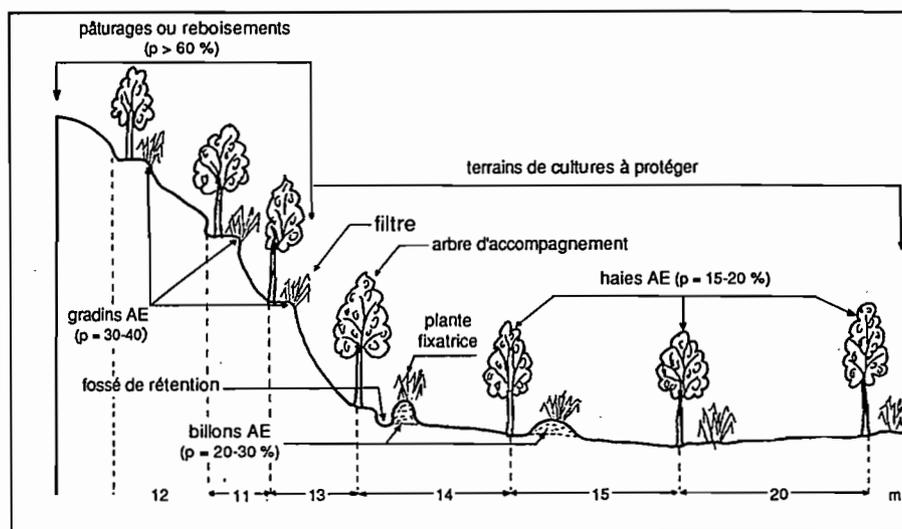


FIG. 6. — Les aménagements antiérosifs proposés par le PDRPO (d'après SIMON, 1983).
Soil conserving equipment suggested by PDRPO (after SIMON, 1983).

Les aménagements proposés semblent peu adaptés au contexte local pour plusieurs raisons :

— les intervalles entre les structures sont trop grands pour les types de pente couramment rencontrés dans la région ;

— les billons isohypses sont difficilement réalisables dans les conditions locales de pente et d'outillage ; en outre, ils provoquent sur les fortes pentes une importante érosion mécanique sèche et peuvent entraîner, en cas d'averses violentes, des glissements de terrain ;

— le creusement des fossés de rétention accélère l'érosion mécanique et impose aux paysans un surcroît de travail ;

— la précision géométrique des mesures — respect strict des courbes de niveau — et l'entretien permanent des ouvrages dépassent l'entendement de paysans pour la plupart analphabètes ;

— certaines espèces proposées entrent en concurrence avec des espèces bien inféodées au milieu (par exemple, le palmier à huile omniprésent dans le sud ne figure pas sur la liste des propositions) ; les paysans peuvent-ils facilement abandonner des habitudes séculaires ?

— la conservation des sols n'est pas présentée par les agents de vulgarisation comme un préalable à l'augmentation de la production agricole ; dès lors, il ne paraît pas aisé de faire entreprendre des aménagements qui, aux yeux des paysans, n'auront aucun effet direct sur l'accroissement de la production ;

— le régime de la propriété du sol et l'organisation interne des concessions familiales ne facilitent pas le respect des normes de mise en place des aménagements ;

— la gestion du projet et l'exécution des travaux sur le terrain sont confiées à l'Uccao. Cette « coopérative caféière » n'intègre pas les femmes au sein du mouvement coopératif, bien que celles-ci soient au centre de toute la vie agricole (FOTSING, 1992).

En somme, les propositions du PDRPO n'ont que timidement affecté les structures agraires traditionnelles. Excepté la mise en valeur des bas-fonds et le reboisement par l'eucalyptus (le premier représentant pour les paysans un « gain de terres supplémentaires » et le second un « moyen de contrôle du foncier »), le bilan du projet est loin d'être positif. Les aménagements antiérosifs n'ont pas dépassé le cadre des « parcelles de démonstration ». Par ailleurs, l'accès aux engrais chimiques se fait à travers les coopératives suivant des méthodes peu démocratiques. Cette situation est aggravée par le statut de « cadets sociaux » des femmes.

QUELQUES PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENT

Les solutions éventuelles pour freiner la dégradation et l'érosion des sols en pays bamiléké se situeraient essentiellement dans l'amélioration des méthodes de gestion de l'eau et de la fertilité des sols, qu'accompagne le renforcement des structures antiérosives. Les aménagements proposés doivent être simples, facilement assimilables par les paysans et tenir compte des habitudes locales. Cependant, les modes d'appropriation du sol et la dispersion des habitations ne permettent pas d'envisager des améliorations à l'échelle des bassins versants. Ils commandent de proposer des solutions à l'échelle régionale d'une part, à l'échelle locale, c'est-à-dire celle des unités d'exploitation familiale, d'autre part. Les intervalles préconisés entre les différentes structures sont donnés à titre indicatif. Ils de-

vront tenir compte de la taille des exploitations et des aménagements en place (FOTSING, 1994).

À l'échelle régionale

• Le maintien et la généralisation, à l'ensemble des terres cultivées, des méthodes traditionnelles d'enfouissement des déchets et de recyclage de la biomasse, des jardins multi-étagés et de la rotation entre parcelles de culture et enclos d'élevage. À condition :

— d'associer les engrais minéraux aux engrais organiques afin d'éviter l'emploi des seuls fertilisants chimiques responsables de la lixiviation des sols ; on veillera à introduire et à commercialiser des engrais appropriés aux cultures annuelles et aux types de sols pour compenser les carences en potasse et en phosphore ; les labours permettant l'enfouissement de P et K avant le semis, des apports de N en cours de végétation seront certainement profitables et moins coûteux (le 20-10-10, couramment utilisé, fournit des unités de P_2O_5 et de K_2O plus chères que les autres produits) ;

— de réorganiser le marché des engrais ainsi que l'ensemble des circuits d'approvisionnement et de commercialisation des produits ; cela permettrait à tous d'accéder aux intrants et d'écouler plus facilement leur production, la création de « banques d'engrais » de quartier, relais entre les associations paysannes et les coopératives agricoles, étant une nécessité fondamentale (FOTSING, 1992).

• L'amélioration de la jachère par l'introduction des plantes améliorantes et des légumineuses de repos du sol. Elles seront semées soit en dérobé sous la dernière culture pendant ou après le dernier sarclage, soit dans les sillons des champs de seconde campagne culturale.

• Un paillage léger (à l'aide des feuilles de bananier, ou de palmier raphia, ou de palmier à huile, et des tiges coupées sur les haies vives...) serait indispensable sur les parcelles cultivées. Sous caféiers ombragés, il évitera les labours fréquents qui provoquent l'érosion mécanique sèche et coupent les racines de l'arbre. Sur les parcelles de cultures vivrières, il freinerait l'évaporation et conserverait une humidité au sol cultivé. Ainsi, les plantes pourraient mieux supporter les déficits hydriques de début de saison culturale.

À l'échelle locale

Des dispositions particulières viendront renforcer les pratiques communes. Elles tiennent compte des spécificités de chaque type de milieu.

Dans les zones montagneuses

• La construction de citernes de captage et de stockage des eaux, pour une meilleure gestion de l'eau en saison sèche. Sur les Bamboutos, par exemple, elle permettrait une irrigation d'appoint des cultures maraîchères de contre-saison, la généralisation de l'irrigation fertilisante observée chez certains maraîchers de Bafou et l'abreuve-

ment du bétail. Cela limiterait la transhumance de saison sèche qui favorise l'invasion des pâturages par les cultivateurs (FOTSING, 1988). Dans les zones de forte concentration humaine, elle piégerait l'eau des toits, des cours et des chemins, laquelle servirait aux besoins domestiques (fabrication des briques de terre, irrigation, lessive...).

- L'association de l'agriculture et de l'élevage du gros bétail, après délimitation précise des zones d'influence de chaque activité. Le bétail serait élevé en semi-stabulation avec une exploitation des parcours selon un système de pâturages tournants, couplé à une courte transhumance de saison sèche. Le fumier des aires de stationnement des troupeaux alimenterait les fosses à fumier et la mise en défens d'une portion du territoire pastoral faciliterait le recrû fourrager.

- Le creusement des fosses à fumier au contact des terroirs pastoraux et des terres agricoles faciliterait la coexistence des deux activités et limiterait les conflits agropastoraux. Le fumier des pâturages mélangé à la paille séchée, coupée sur les parcours, constitue un apport important en fertilisants organiques. Cette technique pourrait réduire la pratique des feux de saison sèche, qui exposent les sols au ruissellement et à l'érosion.

- Le reboisement par l'eucalyptus associé aux arbres fruitiers et aux cultures annuelles sur les versants de 40 à 60 % de pente. Les cultures pratiquées seront des espèces couvrantes et à enracinement peu profond comme l'arachide, l'ail, le poireau et la pomme de terre. Le mode d'exploitation du sol sera fondé sur un système semi-itinérant, couplé à la jachère, avec renouvellement fréquent de la plantation et contrôle strict de la croissance des arbres. Pendant les deux premières années du reboisement, toute la parcelle est cultivée. En même temps, on élimine systématiquement les racines latérales nuisibles aux cultures. Selon le témoignage des paysans, l'arbre ainsi privé de ses racines traçantes superficielles — qui absorberaient l'eau et surtout les nutriments venant de la litière et de la minéralisation de la matière organique — développe ses racines pivotantes et contribue efficacement à la stabilité des versants. Dès la troisième année, jachères et cultures annuelles alternent avec des éclaircies et un renouvellement partiel en dérobé entre les cultures annuelles et les pieds encore en place. Dans le périmètre de reboisement des Bamboutos, des parcelles de pomme de terre, d'ail ou d'oignon prospèrent entre les eucalyptus espacés de cinq à huit mètres.

- L'interdiction de pratiquer toute culture annuelle qui dénude le sol sur les pentes supérieures à 60 % mais le reboisement systématique par l'eucalyptus mélangé en banquettes à d'autres arbres fruitiers ou forestiers. Sur de telles pentes, tout travail du sol entraînerait une destruction irréversible de la structure des sols. Les arbres seront plantés à distance suffisante (3 à 4 m) pour laisser se développer

un sous-étage protecteur du sol contre la battance. L'eucalyptus pourrait ainsi jouer un rôle déterminant dans la stabilité des versants et la lutte contre l'érosion pluviale ; on pourrait créer en dessous un pâturage d'appoint pour le bétail, lorsque les arbres auront atteint 2 m de hauteur et plus. Si le versant repose sur un plan de glissement, les eucalyptus sont exploités en taillis tous les 5-7 ans, afin que le développement du système racinaire pivotant assèche progressivement la nappe souterraine et stabilise le versant. Ses feuilles, par lente humification, agissent comme un mulch et protègent les sols de la battance. Cet arbre fournit aussi du bois de chauffe, du bois d'œuvre et procure des revenus substantiels (FOTSING, 1992).

Dans les zones de polyculture intensive

- La restauration du dispositif bocager traditionnel par l'entretien des « clôtures juridiques » et l'introduction des haies vives fourragères sur les parcelles cultivées, sans trop réduire la surface cultivable. Les espèces proposées (*Leucaena*, *Calliandra calothyrsus* ou hibiscus fourrager) seront taillées tous les trois mois pour fournir du fourrage au bétail et fumer les parcelles. On les installera tous les dix mètres, sur les pentes inférieures à 25 % et tous les 15 m sur les pentes plus fortes. Sur les parties inférieures des haies vives, on installera des bandes enherbées pour renforcer leur efficacité.

- L'incitation à la généralisation de l'élevage du petit bétail (porcs, moutons, lapins et volailles), avec la constitution de troupeaux importants là où la pression foncière et le système d'exploitation du sol autorisent le recours à la jachère. On veillera à observer une rotation fréquente entre enclos et champs cultivés pour valoriser le fumier du bétail.

- La pratique de la compostière-fumière-poubelle sera introduite et généralisée, par exemple à partir des trous où l'on extrait la terre pour la confection des briques, près des habitations. Les déchets de cuisine, les cendres domestiques, la pulpe et la parche de café, les drèches de brasserie, les résidus des élevages hors sol, les stipes de bananier y seront entreposés et se décomposeront lentement à l'ombre des arbres. Les déchets à humification lente seront laissés sur place tandis qu'une partie de cette fumure organique, transportée aux champs, sera associée aux engrais chimiques pour fertiliser les parcelles de marâchage.

- La disposition des billons suivant la pente et les types de culture. Du sommet à la base du versant, on pourrait avoir les orientations suivantes.

Sur les pentes inférieures à 25 % :

- des petits billons isohypses, cloisonnés de préférence sur les champs d'arachide en haut de pente, augmenteraient la capacité d'infiltration des sols et freineraient le ruissellement ; les sillons collecteurs des eaux

seront paillés pour éviter l'attaque des eaux de ruissellement et, partant, briser leur vitesse ;

— des billons en bandes alternées tous les cinq mètres, à mi-versant sur les parcelles de polyculture vivrière associée aux caféières ; les différentes bandes, de cinq à six billons chacune, seront séparées soit par des talus enherbés sur gros billons plantés de haies vives fourragères de graminées et d'arbustes, soit par des cordons de pierres ; ces structures semi-perméables freineraient la vitesse des eaux et, partant, réduiraient le ruissellement ;

— des gros billons perpendiculaires à la pente à proximité des talwegs sur des sols épais réservés aux tubercules et cultivés en permanence ; cette disposition réduirait les risques de ravinement en cas de fortes averses et, du fait de la couverture continue du sol, freinerait l'érosion.

Sur les pentes supérieures à 25 % :

— des billons cloisonnés du sommet de colline au tiers inférieur du versant ; cette disposition tient compte des contraintes physiques qu'impose la préparation des terres et nous semble relativement efficace pour briser la force du ruissellement d'une part, freiner l'évaporation et faciliter l'infiltration des eaux de pluie d'autre part ;

— des billons perpendiculaires à la pente vers le bas du versant, tous les cinq mètres ; si la couverture pédologique est peu épaisse et riche en éléments grossiers, on appliquera le billonnage cloisonné car les associations culturales dans ce cas sont très réduites et le sol est presque nu en période de fortes averses ;

— des petits cordons de pierres disposés dans le sens des courbes de niveau à mi-chemin entre les haies vives dans les zones où la pierrosité du sol est importante ; placés au travers des sillons de circulation des eaux, ils filtreront le ruissellement, freineront la vitesse des eaux et pourraient considérablement réduire l'érosion ;

— des cordons de pierres édifiés à l'amont des haies vives forestières, tous les dix mètres, viendront renforcer les structures antiérosives dans les zones granitiques ; les boules subaffleurantes et les chaos de blocs qui encombreront les terres agricoles fourniront les matériaux nécessaires à leur élaboration ; en freinant l'érosion mécanique, ils constitueront un préalable à la création des terrasses, leur mise en place progressive lors des travaux culturaux n'imposant pas un surcroît de travail aux paysans.

CONCLUSION

La dégradation des sols en pays bamiléké est inversement proportionnelle à l'intensification de la culture. Par une artificialisation poussée du milieu et par le biais d'importants investissements, en temps de travail en particulier,

l'agriculture bamiléké a pu développer un système de mise en valeur du milieu très productif et fortement excédentaire. Cependant, au-delà de 500 habitants au kilomètre carré en agriculture pluviale et de 800 habitants en système irrigué, la modernisation des méthodes d'intensification s'impose. Avec des densités de plus de 1 000 habitants au kilomètre carré, la polyculture intensive des zones basaltiques du plateau a atteint ses limites. Les petites exploitations familiales vivent de plus en plus d'apports extérieurs (double activité, flux monétaires entretenus par les émigrés installés en ville, échanges sociaux...). Même si la quasi-totalité des besoins alimentaires des familles demeure assurée, l'avenir de ces exploitations est compromis du fait des difficultés économiques (chute des cours du café de 45 % de 1987 à 1992, augmentation du prix d'achat des engrais...), d'un accroissement démographique toujours plus important, de l'accélération de la dégradation et de l'« usure » des sols exploités.

Les stratégies actuellement déployées par les paysans (colonisation des terres marginales, diversification culturelle, spécialisation) s'inscrivent dans une « logique de survie » et recherchent avant tout la sécurité alimentaire et l'obtention de revenus monétaires réguliers, le plus souvent au détriment de la conservation de l'environnement. Nos propositions s'inspirent largement des contraintes locales et visent, en même temps, à corriger les insuffisances et à améliorer les pratiques agraires existantes. C'est dans ce sens qu'il faudrait reconsidérer la place des éléments bien inféodés au milieu rural et notamment celle de l'eucalyptus. L'engouement des paysans pour cet arbre est tel que le paysage bamiléké est partout dominé par la silhouette frêle des eucalyptus. Les stratégies conservatoires à adopter concernent l'amélioration des pratiques culturelles traditionnelles afin de permettre une meilleure couverture du sol lors des périodes à risques climatiques importants et une meilleure gestion de la matière organique dans le sol. Toutefois, l'application effective des mesures préconisées passe inévitablement par une refonte de la tenure du sol pour donner aux paysans la sécurité foncière indispensable à toute œuvre durable. Aussi faudrait-il reconsidérer la place de la femme dans la société bamiléké car toute proposition qui ne prendrait pas en compte son rôle central dans la production agricole serait vouée à l'échec. Les responsables de l'Uccao et les bailleurs de fonds internationaux l'apprendront à leurs dépens au moment du bilan d'un projet qui réunissait toutes les conditions financières pour une réussite totale. Pour l'heure, le semi-échec du PDRPO rend urgente la nécessité de repenser les propositions d'aménagement et les formes d'intervention en milieu rural bamiléké sur le double plan technique et socio-économique.

BIBLIOGRAPHIE

- CHAMPAUD (J.), 1973 — *Atlas régional Ouest 2, commentaire des cartes*. Yaoundé, Orstom, 118 p. + 10 cartes.
- DUCRET (G.), FOTSING (J.-M.), 1987 — Évolution des systèmes agraires à Bafou (Ouest-Cameroun). *Revue de Géographie du Cameroun*, 7 (1) : 1-18.
- DUCRET (G.), GRANGERET (I.), 1986 — *Quelques aspects des systèmes de cultures en pays bamiléké*. Dschang, CUDS, 33 p., multigr.
- DONGMO (J.-L.), 1981 — *Le dynamisme bamiléké. Vol. 1. La maîtrise de l'espace agricole*. Yaoundé, Ceper, 424 p.
- FOTSING (J.-M.), 1988 — Problèmes fonciers et élevage bovin en pays bamiléké : exemple du nord de Bafou (Ouest-Cameroun). *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 20 : 43-52.
- FOTSING (J.-M.), 1989 — Colonisation agricole et évolution de l'élevage sur les pentes sud des monts Bamboutos (Ouest-Cameroun). *Revue de Géographie du Cameroun*, 9 (2) : 118-138.
- FOTSING (J.-M.), 1990 — Transformation des pratiques pastorales en milieu d'altitude densément peuplé : les versants méridionaux des monts Bamboutos (Ouest-Cameroun). *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 27 : 32-46.
- FOTSING (J.-M.), 1992 — En marge de l'Uccao : les associations des non-caféiculteurs de la province de l'Ouest du Cameroun. *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 32 : 46-54.
- FOTSING (J.-M.), 1994 — Évolution du bocage bamiléké : exemple d'adaptation traditionnelle à une forte démographie. *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 293-307.
- FOTSING (J.-M.), 1995 — « Compétition foncière et stratégies d'occupation des terres en pays bamiléké (Cameroun) ». In Blanc-Pamard (C.), Cambrezy (L.), éd. : *Terre, terroir, territoire, les tensions foncières*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires, Dynamique des systèmes agraires : 279-288.
- FOTSING (J.-M.), CHAUME (R.), 1995 — Les paysages bamiléké : une approche multi-échelles du bocage à partir des données Landsat et Spot. *Photointerprétation Images aériennes et spatiales*, 33 (95-2) : 75-81 et 111-115.
- FOTSING (J.-M.), TCHAWA (P.), 1993 — Pastoralisme et dégradation/conservation des sols des terroirs d'altitude du Cameroun de l'Ouest. *Bull. Réseau Érosion*, 14 : 359-373.
- FOURNIER (J.), 1993 — Agressivité climatique et risques érosifs dans la région de Dschang, Ouest-Cameroun. *Bull. Réseau Érosion*, 14 : 14-156.
- MORIN (S.), 1989 — *Hautes terres et bassins de l'Ouest-Cameroun*. Thèse doct. État, univ. Bordeaux-III, 2 vol., 1190 p.
- NGOUFO (R.), 1988 — *Les monts Bamboutos : environnement et utilisation de l'espace*. Thèse doct. 3^e cycle, univ. Yaoundé, t. I, 349 p.
- OLIVRY (J.-C.), 1974 — *Régimes hydrologiques en pays bamiléké, la Mifi-sud. T. 2. Interprétation des mesures : modèles et bilan, basses eaux et crues*. Yaoundé, Orstom, 290 p.
- ROOSE (E.), 1977 — *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 78, 108 p.
- ROOSE (E.), 1987 — « Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale : stratégies anciennes et nouvelles ». Communication au séminaire Gestion des eaux, des sols et des plantes, Niamey, 17 p.
- ROOSE (E.), 1989 — « Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale ». Communication à la conférence internationale ISCO 6, Addis-Abeba, Orstom, 26 p.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- SEGALEN (P.), 1967 — Les sols et la géomorphologie au Cameroun. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 5 (2) : 137-147.
- SIMON (A.), 1983 — *Techniques de conservation des sols dans les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun*. Uccao, PHPO, 139 p., multigr.
- SUCHEL (J.-B.), 1987 — *Les climats du Cameroun*. Thèse doct. État, univ. Bordeaux-III, 3 vol., 1186 p. + 1 vol. atlas.
- SUCHEL (J.-B.), 1989 — Les privilèges climatiques du pays bamiléké. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 62 (165) : 29-52.
- TCHAWA (P.), 1991 — *Dynamique des paysages sur la retombée méridionale des hautes terres de l'Ouest-Cameroun*. Thèse doct., univ. Bordeaux-III, 398 p.
- TSALEFAC, 1983 — *L'ambiance climatique des hautes terres de l'Ouest-Cameroun*. Thèse doct. 3^e cycle, univ. Yaoundé, 386 p.
- VALET (S.), 1985 — *Notice explicative des cartes du climat, des paysages agro-géologiques et des propositions d'aptitude à la mise en valeur des paysages agro-géologiques de l'Ouest-Cameroun au 1/200 000*. Montpellier, Cirad-Irat, 120 p.

Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi *

Théodomir RISHIRUMUHIRWA

Iraz, BP 91, Gitega, Burundi.

RÉSUMÉ

Une étude a été menée à la station de Mashitsi (Burundi) pour mettre en évidence la production et le rôle des résidus du bananier dans la gestion du ruissellement et le contrôle de l'érosion.

Concernant la production, les résultats montrent que les rendements en résidus restent faibles sur des sols acides et désaturés (1 à 2,7 t/ha/an de matière sèche selon les densités de plantation). Disposés sous forme de bandes de paillis, ces résidus permettent de couvrir entre 10 et 25 % du sol avec des bandes de 0,5 m, distantes de deux à cinq mètres.

Ces bandes se sont révélées efficaces dans la gestion du ruissellement (2 à 4 %) et dans le contrôle de l'érosion (1,1 à 2,5 t/ha/an contre 40 t/ha/an sur parcelle nue) dès la première année. De plus, l'étude a montré que le paillis complet (10 t/ha/an de matière sèche) améliore les propriétés physiques (perméabilité) et chimiques du sol après trois ans et demi.

Parallèlement, une expérimentation sur la restauration de la fertilité des sols a montré que les rendements du haricot augmentent (de 250 kg à 790 kg/ha) avec différentes doses de fumier (3, 6 et 9 t/ha/an). La courbe de réponse révèle que des doses plus importantes peuvent être envisagées.

Le chaulage seul n'a pas d'effet sur l'accroissement des rendements et ceux obtenus en association avec trois tonnes de fumier ne diffèrent pas significativement quelles que soient les doses appliquées. De plus, les doses supérieures à deux tonnes de chaux semblent avoir un effet dépressif. Dans tous les cas de figure, les rendements restent trop bas et l'opération ne semble pas économiquement justifiée.

Pour tirer profit de ces résultats, il apparaît urgent d'augmenter la production de biomasse dans l'exploitation par le biais de l'intensification de la production des résidus agricoles (du bananier et des autres cultures) avec l'introduction de l'agroforesterie. Les résidus ainsi produits seront utilisés comme paillis et (ou) comme fumier pour la restauration de la fertilité des sols acides, la gestion du ruissellement et le contrôle de l'érosion.

MOTS CLÉS : Burundi — Bananier — Fertilité — Sols ferrallitiques — Sols lessivés — Fumure organique — Paillis — Ruissellement — Érosion.

ABSTRACT

POTENTIALITIES OF THE BANANA TREE IN THE MANAGEMENT AND CONSERVATION OF ACID FERRALITIC SOILS IN BURUNDI

Productivity and effect of banana residues on runoff and erosion had been studied on an acid and leached ferralitic soil at Mashitsi station located in the humid highlands of Burundi. The bananas received very low input (only manure

* Cet article s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, sous la direction du Pr J.-C. VEDY et la codirection de Dr E. ROOSE, de l'Orstom à Montpellier. L'auteur leur témoigne sa reconnaissance pour leur contribution et leurs conseils qui ont guidé la conception et la réalisation de ce travail.

30 kg/banana-tree/year) and suffered of *Cosmopolites sordidus*. Therefore, productivity was very low (1-2.7 t/ha/year of dry matter according to spacing). These residues provided rows of mulch 0.5 m large and spaced 2-5 m. These rows were very efficient in runoff (2-4 %) and erosion control (1.1-2.5 t/ha/year instead of 40.0 t/ha/year on a bared plot) after one year.

It has been pointed out that complete and continuous mulch (10 t/ha/year) increases soil infiltration and improves soil chemical properties after 3.5 years.

Soil fertility improvement by manure and liming had also been studied. Manure increased bean's yields (250 kg to 790 kg/ha with 3 to 9 t/ha/year of manure) but liming seemed not to be efficient and to have a depressive effect at over 2 t/ha. On the other hand, farmers cannot afford to apply liming.

According to these results, the author recommends to increase biomass production in the traditional farming system by improving banana productivity (with manure, N-P-K fertilizers and plant protection) and by introducing alley cropping and agroforestry. The important mass (more than 15 t/ha) of residues produced will then be used as mulch (7-10 t/ha) and/or as manure and will improve soil properties, soil fertility and soil conservation.

KEYWORDS : Burundi — Banana-tree — Soil fertility — Ferrallitic and leached soils — Manure — Mulch — Runoff — Erosion.

RESUMEN

POTENCIALIDADES DEL BANANERO EN LA GESTIÓN Y LA CONSERVACIÓN DE LOS SUELOS FERRALÍTICOS EN BURUNDI

Un estudio fue conducida en la estación de Mashitsi (Burundi) para evidenciar la producción y el papel de los residuos del bananero en la gestión de la arroyada y la lucha contra la erosión.

En lo que se refiere a la producción, los resultados muestran que los rendimientos de residuos permanecen bajos en suelos tan ácidos y desaturados (1-2,7 toneladas de M.S./ha/año según las densidades de plantación). Esos residuos en forma de fajas de mulch permiten cubrir entre 10 y 25 % del suelo con fajas de 0,5 m de ancho y distantes de 2 a 5 m.

Esas fajas se han revelado eficaces en la gestión de la arroyada (2-4 %) y en la lucha contra la erosión (1,1 a 2,5 t/ha/año frente a 40,0 t/ha/año sobre una parcela desnuda) desde el primer año. Además, el estudio ha mostrado que el mulch completo (10 t de M.S./ha/año) mejora las propiedades físicas (permeabilidad) y químicas del suelo después de 3,5 años.

Simultáneamente, una experimentación sobre la restauración de la fertilidad de los suelos ha mostrado que los rendimientos de la judía aumentan (250 kg a 790 kg/ha) con diferentes cantidades de estiércol (3, 6 y 9 t/ha/año). La curva de respuesta revela que cantidades más importantes pueden ser consideradas.

La enmienda caliza sola no tiene ningún efecto sobre el crecimiento de los rendimientos y los obtenidos en asociación con 3 toneladas de estiércol no difieren significativamente cualesquiera que sean las cantidades aplicadas. Además, las cantidades superiores a 2 toneladas de cal parecen tener un efecto nocivo. En todos los casos, los rendimientos permanecen demasiado bajos y la operación no parece justificada desde un punto económico.

Para sacar provecho de esos resultados, parece urgente aumentar la producción de la biomasa en la explotación a través de la intensificación de la producción de los residuos agrícolas (del bananero y de los otros cultivos) e introducir la agrosilvicultura. Los residuos así producidos se utilizarán como mulch y/o como estiércol para la restauración de la fertilidad de los suelos ácidos, la gestión de la arroyada y la lucha contra la erosión.

PALABRAS CLAVES : Burundi — Bananero — Fertilidad — Suelos ferralíticos — Suelos lixiviados — Abonado orgánico — Mulch — Arroyada — Erosión.

INTRODUCTION

Le Burundi est un pays de montagnes situé au cœur de l'Afrique entre 2° 15' et 4° 30' de latitude sud et 29° et 30° 50' de longitude est. Sa superficie totale est de 27 834 km² (BIDOU *et al.*, 1991) (fig. 1).

La densité de population y est l'une des plus élevées du continent africain (250 à plus de 700 habitants au kilo-

mètre carré) et, avec un taux de croissance de 2,65 % par an, le nombre d'habitants double tous les vingt-cinq ans.

Le problème que ce pays a à résoudre est d'assurer l'autosuffisance alimentaire de la population sur des sols très désaturés, soumis à une érosion hydrique intense, dans le contexte d'une agriculture traditionnelle de subsistance à faibles intrants.

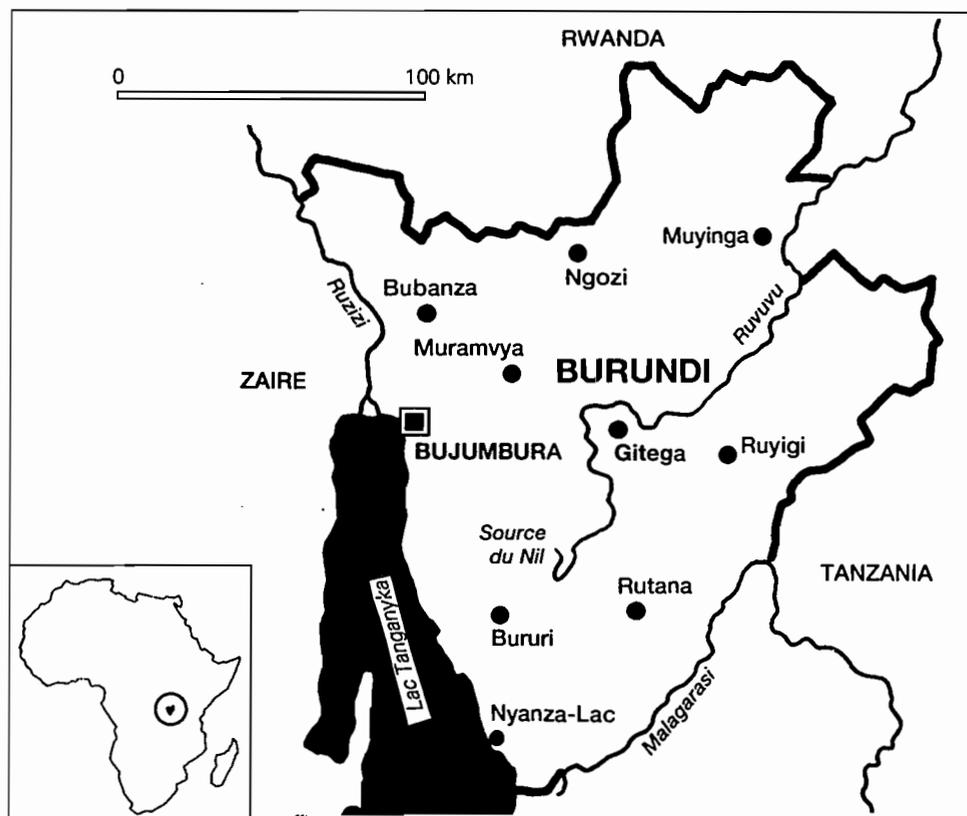


FIG. 1. — Carte de situation.
Situation map.

En effet, les sols burundais se sont formés sous forêts submontagnardes et savanes et sous un climat subtropical humide (pluviosité : 1 000 à 1 600 mm de pluies par an). Ces conditions de température et d'humidité, accompagnées de mouvements d'infiltration importants, ont favorisé l'hydrolyse des minéraux et la lixiviation des bases échangeables par le drainage interne, et ont conduit à la genèse de sols ferrallitiques très désaturés.

La pression démographique, qui atteint aujourd'hui des proportions insoutenables, a conduit au défrichement et à la mise en culture des terres marginales. Les formations végétales naturelles ne représentaient en 1982 (MINAGRI, 1982) que 3 % du territoire national. Les sols, qui étaient déjà désaturés, ont été dès lors soumis à une érosion hydrique intense.

Pour faire face à ce défi, le Burundi doit adapter l'augmentation de la production vivrière au taux de croissance de la population. Cela implique des stratégies visant à l'intensification de l'agriculture par la maîtrise de facteurs de production tels que les intrants (semences, engrais, pesticides...) et le crédit agricole. C'est dans ce cadre que devra s'inscrire la restauration de la fertilité et la gestion

conservatoire du sol, facteur de production rare et fortement dégradé.

L'objet de cet article est de montrer que le bananier, principale culture du Burundi, peut apporter une contribution importante à la résolution de ce problème. Nous nous proposons de mettre en évidence, par trois expérimentations, la part de cette culture dans la production de biomasse au sein de l'exploitation, et l'importance primordiale de la matière organique ainsi produite dans la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques désaturés et dans la réduction du ruissellement et de l'érosion.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Cadre de l'étude

Les trois essais ont été menés à la station expérimentale de l'Iraz à Mashitsi, qui se trouve à 12 km de Gitega, deuxième ville du pays, située au centre du Burundi.

L'altitude est d'environ 1 650 m et le climat (Aw3 selon Köppen) enregistre des précipitations annuelles de 1 157 mm réparties sur neuf mois (octobre-mai) et une température moyenne annuelle de 18,7 °C (RISHIRUMHIRWA, 1989).

Les indices d'érosion, déterminés sur trois ans, montrent que l'érosivité des pluies est de 460,7 et l'érodibilité du sol de 0,14. Les essais étant faits sur une pente de 8 %, l'indice de pente LS est de 0,78 pour une longueur de 20 m et de 0,98 pour 30 m, qui sont les longueurs retenues pour les parcelles d'érosion (RISHIRUMUHIRWA, 1993).

Les essais ont été installés dans une unité cartographique caractérisée par un sol acide, très désaturé, situé sur un replat d'une pente de 8 %, en aval d'une cuirasse latéritique, clairsemé de quelques petites termitières (moins d'une par hectare) de hauteur inférieure à 0,75 m et de diamètre ne dépassant pas 1,5 m. Cette unité a été classée comme un hygro-xéro-ferralsol typique (classification Ineac) ou Ultic Haplustox (Soil Taxonomy).

Les propriétés de cette unité sont présentées ci-après (description de profil) et dans le tableau I (bulletin analytique).

• Description du profil Mashitsi (RISHIRUMUHIRWA *et al.*, 1989).

A1 0 cm Argileux ; brun-rougeâtre foncé (2,5 YR 3/4) ; structure massive se subdivisant en polyédrique subangulaire moyenne, faiblement développée ; non collant, non plastique, friable ; pores très nombreux, intersti-

tiels et tubulaires, fins et moyens ; racines assez nombreuses et fines ; transition diffuse et régulière.

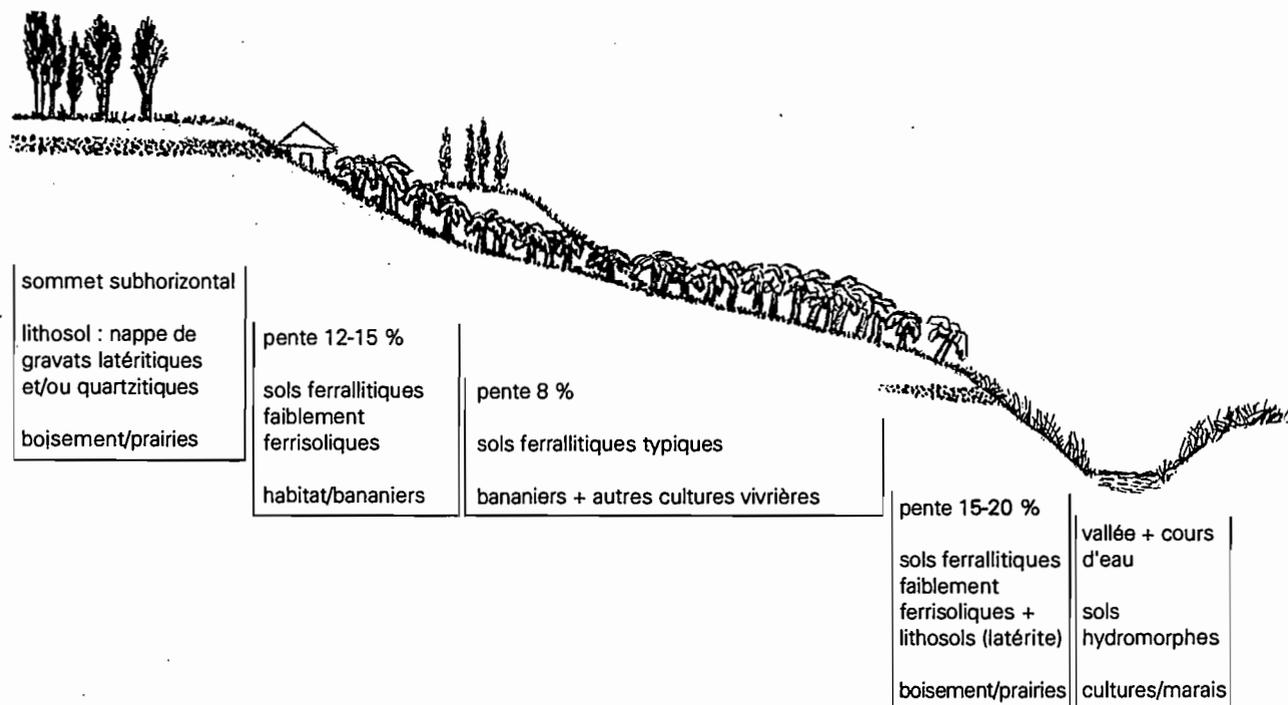
A3 17 cm Argileux ; brun rougeâtre foncé (2,5 YR 3/4) ; structure massive ; non collant, non plastique, friable ; pores très nombreux, interstitiels et tubulaires, fins et moyens ; racines assez nombreuses et fines ; transition diffuse et régulière.

B21 40 cm Argileux ; brun rougeâtre foncé (2,5 YR 3/4) ; structure massive ; peu collant, peu plastique, friable ; pores nombreux fins, interstitiels et tubulaires ; racines assez nombreuses et fines ; transition graduelle et régulière.

B22 75 cm Argileux, brun rougeâtre foncé (2,5 YR 3/5) ; structure massive se subdivisant en polyédrique subangulaire fine à moyenne, faiblement développée ; collant, plastique, friable ; pores assez nombreux fins et très fins, interstitiels et tubulaires ; racines assez nombreuses et fines ; quelques argillanes fins à peine visibles.

160 cm Limite de la description.

• Toposéquence



• Propriétés agrochimiques des parcelles d'essais

Les parcelles d'essais ont également fait l'objet d'analyses agrochimiques dans les vingt premiers centimètres. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau II.

Protocoles

L'étude porte sur trois essais distincts : un essai sur la production de résidus organiques du bananier en fonction des densités de plantation et le pourcentage de sol qu'ils peuvent couvrir ; un essai sur l'efficacité de ces résidus dans la maîtrise du ruissellement et de l'érosion ; un essai sur la restauration de la très basse fertilité de ces sols.

BANANIER ET PRODUCTION DE BIOMASSE, TAUX DE COUVERTURE DU SOL

L'étude a porté sur la production de biomasse par les bananiers plantés sur les parcelles de l'essai « ruissellement et érosion ». On a tenu compte uniquement des résidus qui restent généralement au champ.

Les feuilles mortes et les stipes sont pesés 2 fois l'an à chaque œilletonnage (octobre et mai) sur dix souches de bananier prises au hasard sur chaque parcelle de 450 m². Par contre, les stipes porteurs de régimes sont pesés à chaque récolte. Les poids frais sont convertis en matière sèche suivant les taux déterminés sur des échantillons de référence (soit 34 % pour les feuilles sèches et 13 % pour les stipes).

TABLEAU I
Bulletin analytique du profil Mashitsi
Agrochemical properties of Mashitsi profile

Épaisseur en cm	Horizon	Refus à 2 mm	Granulométrie (microns) en %								Matière organique			
			0-2	2-20	20-50	50-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000	C	N	C/N	
0-17	A1	--	50,3	2,1	4,9	7,2	23,0	11,1	1,3	0,1	1,42	0,09	15,8	
17-40	A3	--	54,4	2,5	5,4	7,8	21,5	6,9	1,4	0,1	1,34	0,08	16,8	
40-75	B21	--	56,9	2,3	6,0	7,6	18,1	7,8	1,2	0,1	1,10	0,06	18,3	
75-160	B22	--	62,1	2,5	6,5	8,1	14,2	5,3	1,2	0,1	0,58	0,04	14,5	
pH 1/5 20 °C	Concentr. 1/5 20 °C		Complexe absorbant en méq/100 g											P en ppm (O-D) ²
			Bases				Valeurs S - T - V ¹					T - V eff.		
H ₂ O	KCl	mmho	Ca	Mg	K	Na	S bas.	CEC	V	Al ³⁺	+ H ⁺	T eff.	V eff.	
4,7	4,2	0,014	0,11	0,08	0,04	0,02	0,25	6,99	4%	1,48	0,10	1,83	86%	15
4,8	4,2	0,011	0,19	0,10	0,04	0,02	0,35	6,19	6%	1,59	0,08	2,02	83%	13
5,0	4,2	0,006	0,07	0,06	0,04	0,02	0,19	5,79	3%	1,34	0,06	1,59	88%	5
5,1	4,8	0,004	0,06	0,04	0,01	0,04	0,16	4,59	3%	0,14	0,01	0,31	50%	15

¹S = somme des bases ; T = total des bases ; V = % S/T. ² Phosphore suivant la méthode de Olsen-Dabin.

TABLEAU II
Propriétés agrochimiques des parcelles des essais fumure organique et chaulage
Agrochemical properties of manure and liming trial plots

	pH	C (%)	N (%)	C/N	Al ³⁺	H ⁺	Ca	Mg	K	Na	S base	S acide	CEC	T eff.	V	V eff.	I. Kam	P (O-D)
(1)	3,9	1,31	0,1	12	1,76	0,18	0,14	0,08	0,06	0,03	0,33	1,95	4,52	2,28	7%	50%	84%	10
(2)	4,2	1,7	0,16	10,6			0,12	0,07	0,05	0,04	0,28		12,41		2%			

(1): Essai restauration et gestion de la fertilité.

(2): Essai production de biomasse, ruissellement et érosion.

Les résidus produits par chaque ligne de bananier perpendiculaire à la pente sont ensuite utilisés comme paillis disposé en bandes dont la largeur a été fixée arbitrairement à 0,5 m. On obtient alors, dans les conditions de l'expérimentation, un paillis de 7 cm d'épaisseur.

La variété étudiée est une banane à cuire connue sous le nom vernaculaire de « Mbwazirume », qui est un triploïde du groupe *Musa accuminata*.

GESTION DU RUISSELLEMENT ET CONTRÔLE DE L'ÉROSION

L'étude a été menée sur des parcelles d'érosion isolées par un muret de 30 cm de hauteur et munies, en aval, d'un système de collecte du ruissellement et des terres érodées constitué de deux fûts de 200 litres. Le premier, appelé partiteur, a cinq ouvertures d'évacuation du trop-plein dont une communique avec le second fût. Les deux fûts portent chacun un couvercle.

Les traitements retenus sont les suivants : une parcelle nue (de Wischmeier ou témoin international) de 100 m² (5 m x 20 m) et quatre autres parcelles de 450 m² (15 m x 30 m). Sur ces dernières, des bananiers ont été plantés aux densités suivantes : 3 m x 2 m (1 667 pieds à l'hectare), 3 m x 3 m (1 000 pieds à l'hectare), 3 m x 3 m + paillis complet et 3 m x 5 m (667 pieds à l'hectare).

Le paillis complet est obtenu par les résidus bananiers de la parcelle auxquels on ajoute des apports extérieurs de *Hyparrhenia*. La composition de ces paillis et résidus est reprise dans le tableau III qui donne également la composition du fumier utilisé dans les essais « restauration de la fertilité ».

Les paramètres étudiés sont le ruissellement et l'érosion selon les différents traitements et l'évolution des propriétés du sol sur parcelle nue et sous paillis complet.

TABLEAU III
Composition des résidus du bananier et de *Hyparrhenia* (% et ‰ de matière sèche)
Banana residues and Hyparrhenia chemical composition (% or ‰ of dry matter)

	Ca ⁺⁺ (‰)	Mg ⁺⁺ (‰)	K ⁺ (‰)	Na ⁺ (‰)	P ₂ O ₅ (‰)	N total (%)
Résidus de bananiers	9,7	3,3	43,6		1,0	0,8
<i>Hyparrhenia</i>	2,0	1,8	10,6		0,8	1,0
Fumier	6,3	3,5	10,7	1,1	2,9	1,8

RESTAURATION ET GESTION DE LA FERTILITÉ

L'étude a porté sur la réponse du haricot à la fumure organique et au chaulage. Pour cela, trois essais ont été mis en place : l'essai « fumure organique seule » (0, 3, 6 et 9 t/ha de fumier), l'essai « fumure organique plus amendement calcaire » (même dose plus 2 t/ha de chaux tous les trois ans) et l'essai « chaulage » (0, 1, 2, 3 et 4 t/ha pour trois ans, en présence d'une dose annuelle de 3 t/ha/an de fumier).

La matière organique est du fumier de ferme dont la composition est donnée dans le tableau III. La chaux est une dolomie dosant respectivement 41,2 et 41,6 % de CaO et MgO.

La variété de haricot utilisée est la variété naine A321 diffusée dans la région.

Le protocole comporte quatre blocs randomisés avec quatre répétitions. Les observations ont porté sur les rendements en graines et sur l'évolution des propriétés chimiques du sol.

Méthodes

Pour les trois essais, les analyses de sols, de la chaux, des pailles et du fumier ont été faites au laboratoire de chimie agricole de l'Isabu qui utilise les méthodes suivantes : Atterberg pour la granulométrie, spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) après percolation à l'acétate d'ammonium 1N à pH 7 pour les bases échangeables,

suspension liquide/sol de 1/5 pour les pH eau et KCl 1N, méthode Kjeldhal pour l'azote, Walkey et Black pour le carbone et colorimétrie au bleu de phosphomolybdate (Olsen-Dabin) pour le phosphore.

La perméabilité *in situ* a été réalisée au perméamètre à doubles anneaux (de la Faculté des sciences agronomiques du Burundi).

Les quantités d'eau ruisselée sont déterminées par une jauge, calibrée en centimètres, dans chaque fût pour des quantités supérieures à 40 litres et par une éprouvette d'un litre, graduée en millilitres, pour des quantités inférieures. À partir des valeurs obtenues, on calcule le ruissellement (coefficient de ruissellement Kr) comme suit : $Kr = (\text{volume d'eau ruisselée} / \text{volume d'eau tombée}) \times 100$ par averse. On en déduit le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram) et le coefficient de ruissellement maximal pour une grosse averse (Kmax) sur une période de douze mois.

Les boues érodées sont pesées sur une balance de terrain (précision ± 50 g), le poids obtenu est traduit en matière sèche à partir d'échantillons de référence séchés à l'étuve et repesés pour déterminer le taux d'humidité avec une balance analytique (précision ± 1 g).

La production de paillis et les rendements des cultures sont déterminés par pesée sur une balance avec une marge

d'erreur de ± 10 g. Le taux de couverture du sol par ces résidus, en pourcentage de la surface totale, est déduit de l'écartement entre les bananiers et de la largeur de chaque bande de paillis.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Bananier et production de biomasse, taux de couverture du sol

Les productions de biomasse par les différents traitements et les taux de couverture du sol sont présentés dans le tableau IV.

Ces résultats montrent une faible production de résidus (1 à 2,7 t/ha/an suivant les traitements). Ils ont été obtenus dans des conditions marginales de fertilité et de pression parasitaire. En effet, les sols sont très pauvres comme en témoignent les analyses. Les bananiers ne reçoivent comme fumure que du fumier à la dose de 30 kg par souche

et par an. Par ailleurs, les bananiers ont subi une forte pression parasitaire de *Cosmopolites sordidus* (charançon du bananier) et de *Erwinia* (une maladie bactérienne).

On peut également considérer que les conditions climatiques de la région ne sont pas idéales ; la température moyenne annuelle est plus basse que l'optimum, que CERIGHELLI (1955) situe au-delà de 20 ° C. Le bananier souffre, en plus, de stress hydrique pendant la saison sèche. Le cycle végétatif de la culture s'en trouve considérablement allongé. En effet, dans les conditions de Mashitsi, il est de 771 jours pour « Mwazirume » et de 799 jours pour « Poyo » (données non encore publiées) alors qu'il varie de 300 à 360 jours en basse altitude (CERIGHELLI, *op. cit.*).

En Côte d'Ivoire, sous des conditions climatiques de température et d'humidité plus favorables et avec de fortes fumures minérales, ROOSE (1977), citant Prevel, rapporte des productions de 17 tonnes de matière sèche sur un cycle de dix mois.

TABLEAU IV
Production de biomasse (kg/ha de matière sèche) et taux de couverture du sol (%) par les résidus du bananier à la station d'essais érosion à Mashitsi
Biomass production (kg/ha of dry matter) and rate of soil cover (%) by banana residues on erosion plots at Mashitsi

Traitement	Feuilles coupe 1	Feuilles coupe 2	Stipes	<i>Hypparhenia</i>	Total/an	% couverture
3 m x 3 m + paillis	257	230	1 179	7 933	9 599	100
2 m x 3 m	394	380	1 947	0	2 721	25
3 m x 3 m	257	230	1 179	0	1 666	17
5 m x 3 m	158	153	786	0	1 097	10
Réf. Wischmeir *	0	0	0	0	0	0

* Réf. Wischmeir = parcelle de référence (de Wischmeier) ou parcelle nue.

Au Rwanda, ROOSE et NDAYIZIGIYE (1994) enregistrent des productions en station de 3,3 tonnes de feuilles, de 2 à 6 tonnes de stipes de bananes, de 2 à 5 tonnes de résidus de maïs ou de sorgho et de 0,5 à 2 tonnes de résidus de haricot, d'arachide ou de manioc. Selon les mêmes auteurs, 200 arbres produiraient de 1 à 4 tonnes de feuilles et les haies vives de 3 à 9 tonnes.

Les productions enregistrées à Mashitsi seraient beaucoup plus importantes (10-15 t/ha/an) avec une fumure organique suffisante, des engrais minéraux et une bonne protection phytosanitaire.

Résidus du bananier, gestion du ruissellement et contrôle de l'érosion

GESTION DU RUISSÈLEMENT

Coefficients de ruissellement

Le calcul du ruissellement par classe d'averses, du ruissellement annuel moyen et du ruissellement maximal pour

l'année d'expérimentation (1992) a permis d'établir le tableau V.

Les chiffres montrent que le ruissellement augmente avec les classes de hauteur des averses quels que soient les traitements. Il est très faible pour le paillis complet (< 1 %), et ne dépasse guère 7 % pour les autres traitements. De plus, Kr par averse, Kram et Krmax tendent à augmenter quand l'écartement entre les bananiers augmente.

Kram varie de 2,1 à 4 % pour les différentes bandes de paillis. Il est de 0,7 % pour le paillis complet et de 18 % pour la parcelle nue. Quant à Krmax, il est très élevé sur la parcelle nue (76,5 %) et insignifiant sous paillis complet (0,9 %). Il varie de 5,3 à 18,5 % pour les autres traitements.

Nous avons comparé ces résultats avec ceux obtenus dans d'autres conditions d'expérimentation dans la région et en Afrique de l'Ouest. À Kanyosha (près de Bujum-

TABLEAU V
Coefficients de ruissellement par classe d'averses, annuel moyen (Kram), maximum (Krmax)
et taux de couverture du sol (%)
Soil cover (%), rate of runoff per rain, per year (Kram) and maximum (Krmax)

Kr/classe averses	Traitement				
	3 m x 3 m + p.*	2 m x 3 m	3 m x 3 m	3 m x 5 m	Réf. Wisch.
< 5 mm	0,3	0,5	0,7	0,6	1,3
5-10 mm	0,6	0,8	1,0	0,9	1,5
10-20 mm	0,6	1,6	2,1	3,9	15,7
20-40 mm	0,7	2,5	3,5	6,7	33,6
40-60 mm	0,8	4,6	4,0	5,3	22,3
Krmax	0,9	5,3	10,1	18,5	76,5
Kram	0,7	2,1	2,5	4,0	18,0
Taux de couverture du sol (%)	100	25	16,7	10	0

* p. = paillis permanent de 7 cm d'épaisseur.

tura), sur une pente de 45 %, DUCHAUFOR *et al.* (1991) ont étudié le ruissellement avec différents dispositifs de lutte antiérosive. Ils ont trouvé des ruissellements moyens annuels qui varient de 3,9 à 6,7 % pour des bandes de caféier paillé tous les dix mètres, des haies de *Setaria* et de *Calliandra* et des combinaisons de ces dispositifs. Dans les mêmes conditions, ils observent un ruissellement de 12,3 % en l'absence d'aménagement.

NDAYIZIGIYE (1993) a montré que les haies de *Calliandra*, de *Leucaena* et mixtes réduisent le ruissellement à $\pm 1,8$ % sur une pente de 23 % mais seulement après deux ans. Avec les bandes de résidus de bananier, distantes de deux et cinq mètres, on aboutit au même résultat dès la première année.

En Côte d'Ivoire, avec des précipitations variant de 1 468 à 2 052 mm par an, ROOSE et GODEFROY (1977) ont observé sous bananier et sous forêt dense des ruissellements de 12 et 5,5 %.

Il apparaît donc que le ruissellement est faible (sauf sur la parcelle nue) et que les bandes de paillis des résidus de bananier le réduisent dès la première année de plantation, ce qui présente un avantage vis-à-vis des haies, qui mettent deux ans pour s'établir et produire suffisamment de biomasse pour réduire la circulation de l'eau sur la parcelle.

Modélisation du ruissellement

La modélisation a été faite pour prévoir le comportement du ruissellement quand l'écartement entre les bandes de paillis ou le taux de couverture du sol varient. Elle a consisté à tester des ajustements linéaires, semi-logarithmiques et logarithmiques entre les paramètres considérés. La formulation mathématique a été établie par linéarisation de l'ajustement obtenu.

Ruissellement et écartement entre les bandes de paillis

On modélise ici Kram et Krmax avec les écartements entre les bandes de paillis sans tenir compte de la parcelle nue et de la parcelle paillée.

Les régressions obtenues sont de type linéaire de forme :
Kram = 0,87 + 0,63X et Krmax = 4,37X - 3,27
où X = écartement en mètres (a)

Ces droites, représentées sur la figure 2, ont des coefficients de corrélation r^2 respectivement de 99,8 % et 99,9 %. Ce qui traduit une très bonne corrélation.

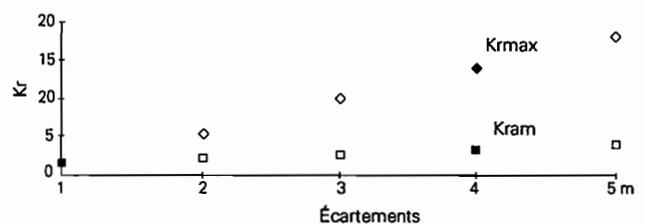


FIG. 2. — Modélisation ruissellement-écartement entre bandes de paillis.

Runoff and distance between mulch rows.

Ruissellement et taux de couverture du sol

Il est certainement plus intéressant de considérer non pas les écartements, mais plutôt les taux de recouvrement du sol. En effet, une même densité de plantation peut avoir une productivité différente en résidus en fonction de facteurs tels que la fertilité, le climat ou les maladies. Cela nous a amené à tester la corrélation ruissellement-taux de couverture du sol.

Le meilleur ajustement obtenu est de type logarithmique avec les équations suivantes pour Kram et Krmax (où

X = % couverture sol), graphiquement représentées sur la figure 3.

$\text{Log}(K_{ram}) = 1,27 - 0,7 \text{ Log}X$
 et $\text{Log}(K_{rmax}) = 2,03 - 0,947 \text{ Log}X$

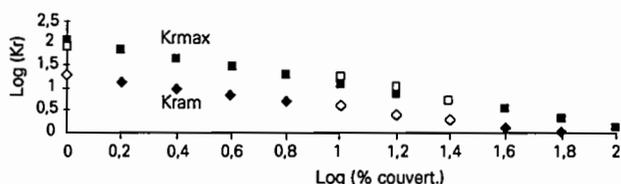


FIG. 3. — Modélisation ruissellement-taux de couverture du sol. Runoff and soil cover rate.

CONTRÔLE DE L'ÉROSION

Pertes en terre et indice cultural

Les pertes en terre et les indices culturaux observés sont présentés dans le tableau VI.

Selon ces résultats, le paillis en bandes est très efficace et réduit considérablement l'érosion. NDAYIZIGIYE (1993) enregistre à Rubona des pertes en terre comparables avec des haies de *Calliandra* et de *Leucaena*, mais après deux ans d'installation.

Les indices culturaux observés varient de 0,03 à 0,06 selon les écartements entre bananiers. Plusieurs auteurs ont montré que les principales cultures vivrières, en Afrique, ont des indices culturaux plus élevés compris entre 0,1 et 0,9, comme le montre le tableau VII.

TABLEAU VI
 Érosion (t/ha), indices culturaux et taux de couverture du sol
 Soil cover (%), soil losses (t/ha) and soil cover index

Traitement	Érosion (t/ha)	Indice C	Taux de couverture (%)
3 m x 3m + paillis	0,06	0,00	100
2 m x 3m	1,14	0,03	25
3 m x 3m	2,36	0,06	16,7
5 m x 3m	2,47	0,06	10
Réf. Wischmeir	40,52	1,00	0

TABLEAU VII
 Indices culturaux de quelques cultures tropicales
 Soil cover index of some tropical crops

Type de végétation	Indice C
sol nu	1
forêt dense ou paillis abondant	0,001
savane/prairie en bon état	0,01
savane/prairie brûlée/surpâturée	0,1
maïs/sorgho	0,4-0,9
arachide	0,4-0,8
manioc/igname	0,2-0,8

Type de végétation	Indice C
sol nu	1
culture paillée/pinède	0,001
bananeraie	0,07-0,14
manioc traditionnel	0,10-0,16
patate douce traditionnelle	0,53
association haricot-maïs	0,62

Source : ROOSE, 1977.

Source : Rapport annuel Isabu 1989-1990.

Modélisation de l'érosion

Les ajustements linéaire, semi-logarithmique et logarithmique de la relation érosion-écartement des bandes de paillis ont des coefficients r^2 de 64,4 %, 62,3 % et 73,8 %. Pour le couple érosion-taux de couverture du sol, ce coefficient est de 94,5 % avec l'ajustement logarithmique. La figure 4 et la droite de l'équation suivante donnent la linéarisation de cet ajustement :

$\text{Log}A = 4,76 - 1,35 \text{ log}X$ où A = érosion en kg/ha et X = taux de couverture du sol en %

Le bon comportement exponentiel inverse de l'érosion vis-à-vis du taux de couverture du sol est à comparer avec la relation indice cultural-taux de couverture du sol mise en évidence par Wischmeier, qui obéit également à une loi exponentielle inverse. Le même auteur, cité par ROOSE (1994), a montré que l'allure de la courbe obtenue est, par ailleurs, fonction de la hauteur de la canopée.

À partir des équations de modélisation du ruissellement (b) et de l'érosion (c), on a dressé le tableau VIII qui permet de prédire le ruissellement, les pertes en terre et l'indice cultural dans plusieurs cas de figure du taux de couverture du sol.

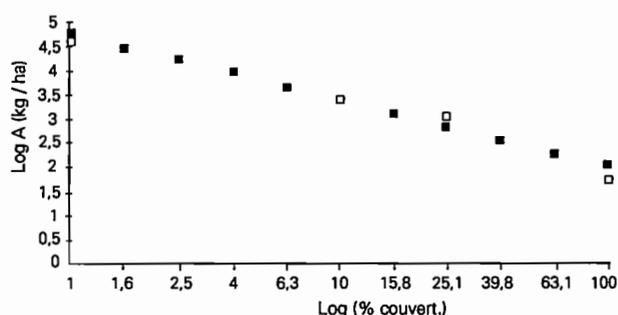


FIG. 4. — Modélisation érosion-taux de couverture du sol.
Soil losses and soil cover rate.

TABLEAU VIII
Couverture du sol, production de résidus, ruissellement, érosion et indice cultural
Soil cover, residues production, runoff, soil losses and soil cover index

Couverture (%)	Résidus (t/ha)	Kram(%)	Krmax (%)	Érosion (t/ha)	Indice C
25	2,4	2,0	5,1	1,14	0,028
35	3,4	1,5	3,7	0,47	0,012
50	4,8	1,2	2,6	0,29	0,007
75	7,2	0,9	1,8	0,17	0,004
100	9,6	0,7	1,4	0,12	0,003

ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS DU SOL SOUS PAILLIS COMPLET ET SOUS PARCELLE DE WISCHMEIER

L'étude de l'évolution des propriétés du sol a été faite sur parcelle de Wischmeier et sous paillis permanent après trois ans et demi de fonctionnement des parcelles d'érosion, en collaboration avec la Faculté d'agronomie du Burundi (NYABUHWANYA, 1993). Une jachère naturelle non perturbée depuis l'installation de l'essai, se trouvant à

proximité immédiate des parcelles d'érosion, a servi de témoin. Elle est supposée représenter les propriétés initiales du sol.

Perméabilité

Des mesures de perméabilité ont été faites en novembre 1991, janvier, avril et juillet 1992 sur les trois parcelles. Les résultats sont donnés dans le tableau IX.

TABLEAU IX
Perméabilité (cm/h) sous paillis complet, jachère à *Eragrostis*, et parcelle nue
Soil infiltration rate (cm/h) under mulched, *Eragrostis fallow* and bared plot

Traitement	Nov. 1991	Jan. 92	Avril 92	Juil. 92	Moyenne	Écart-type
Parcelle + paillis	73,8	84,0	82,2	84,0	81,0	7,2
Jachère naturelle	43,8	37,0	42,0	37,2	40,5	4,7
Réf. Wischmeier	15,0	18,0	16,8	21,0	17,7	4,2

L'analyse statistique de ces résultats a montré des différences très hautement significatives entre les traitements. Par rapport à la jachère naturelle (état initial du sol), la perméabilité a augmenté sous parcelle paillée (elle a doublé) et a diminué très fortement (réduite de moitié) sous parcelle de Wischmeier.

Cela semble lié au fait que les états de surface sur parcelle nue se dégradent au cours du temps suite à la formation de pellicules de battance, très nombreuses à la surface. En revanche, le paillis jouerait un rôle de régula-

teur des débits des précipitations, protégerait la surface contre la battance des gouttes de pluie et favoriserait l'activité des vers de terre et des termites.

Par ailleurs, on pourrait attribuer la meilleure perméabilité du sol sous paillis à l'amélioration de structure grâce à l'augmentation de la teneur en matière organique (5,7 % contre 3 % sous une jachère naturelle) et probablement des complexes argilo-humiques (HÉNIN *et al.*, 1969 ; SOLTNER, 1975).

Ces résultats s'expliquent par l'augmentation de la porosité biologique due à une plus forte activité de la mésofaune (termites) qui serait stimulée par l'apport de paillis. LAL (1975) aboutit aux mêmes conclusions dans une étude sur le rôle du paillis dans les propriétés physiques et chimiques du sol. Il a également montré que la perméabilité du sol diminue dès qu'il est mis sous culture. Dans un sol

du Nigeria, elle passe de 150 cm/h à 90 cm/h sous maïs et à 40 cm/h sur une parcelle non protégée.

Granulométrie

Des analyses granulométriques ont été faites sur des échantillons de sols prélevés dans les vingt premiers centimètres. Les résultats sont présentés dans le tableau X.

TABLEAU X
Évolution de la granulométrie sous l'effet de l'érosion à la station de Mashitsi
Soil losses and soil particles behavior on erosion plots at Mashitsi

Traitement	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
Parcelle + paillis	55,2	7,7	37,2
Jachère naturelle	49,3	5,7	44,8
Réf. Wischmeier	37,2	14,4	48,3

La teneur en argile de la parcelle nue, qui a subi la plus forte érosion, a chuté de 12 % par rapport à la jachère naturelle. Cela est à mettre en rapport avec le phénomène de sélectivité des particules pendant le processus d'érosion. En effet, les argiles sont éliminées en priorité. Ce qui se traduit par un appauvrissement absolu en particules argileuses et un enrichissement relatif en limon et en sable.

La teneur en argile de la jachère est inférieure à celle de la parcelle paillée. Cela indique qu'elle a également subi une érosion sélective. L'hypothèse selon laquelle la

jachère représenterait les propriétés initiales du sol est donc à prendre avec réserve. Ses propriétés se dégradent également mais plus lentement que sous culture non paillée totalement et plus lentement encore que sur parcelle nue.

Propriétés chimiques

Le tableau XI présente les résultats des analyses chimiques des vingt premiers centimètres des trois parcelles (Wischmeier, jachère et paillis complet).

TABLEAU XI
Évolution des propriétés chimiques du sol (CEC en méq/100 g, C et N en %) sous paillis complet, jachère et parcelle nue
Soil chemical properties behavior (CEC in meq/100 g, C and N in %) under mulched, fallow and bared plot

Traitement	pH eau	pH KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	CEC	C	N	C/N
Parcelle + paillis	6,0	4,8	0,89	1,00	0,41	0,02	2,34	25,44	3,28	0,56	11,5
Jachère naturelle	4,7	4,2	0,12	0,07	0,05	0,04	0,26	12,41	1,70	0,16	10,6
Réf. Wischmeier	4,2	4,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,12	6,00	0,82	0,07	13,0

Ces résultats montrent que les propriétés chimiques s'améliorent sous paillis complet malgré des risques de drainage alors qu'elles se dégradent sous parcelle de Wischmeier.

Le pH eau sous paillis augmente par rapport à la jachère naturelle de même que les bases échangeables, la CEC et la matière organique.

On peut attribuer cette amélioration à l'augmentation de la teneur en matière organique (de 3,0 % à 5,8 %) qui contribue à l'accroissement de la capacité d'échange du sol (augmentation de la teneur en humus). Sa minéralisation libère des éléments fertilisants qui améliorent le statut en bases échangeables.

L'apport de paillis complet est d'environ 10 t/ha/an de matière sèche (8 t de *Hypparhenia* + 2 t de résidus de

bananier). Cela représente environ 35 kg de Ca, 21 kg de Mg, 172 kg de K, 8,4 kg de P₂O₅ et 96 kg de N d'apport annuel si on se réfère aux deux sources de paillis, à leur proportion et à leur composition chimique.

La diminution de la teneur en matière organique et des bases échangeables de la parcelle nue par rapport à la jachère naturelle (de 3,0 % à 1,4 %) semble indiquer que le phénomène de sélectivité de l'érosion touche également les résidus organiques fins, les colloïdes et les éléments solubles. Elle emporte, de ce fait, les facteurs de fertilité et contribue ainsi à la chute des rendements.

La sélectivité serait plus importante avec l'érosion en nappe qu'avec l'érosion en rigole (Roose, 1994). Or c'est précisément cette forme d'érosion qui semble la plus importante dans les conditions d'expérimentation. En effet,

le nombre annuel d'averses qui provoquent la formation de rigoles sur les parcelles est réduit à Mashitsi.

LAL (1975) confirme également que le paillis permet de maintenir un taux de matière organique et une capacité d'échange cationique élevés.

Gestion de la fertilité

Cette expérimentation cherchait à mettre en évidence l'importance de la matière organique dans la restauration de la fertilité du sol. Pour des raisons de temps, nous avons choisi comme culture test le haricot du fait de son cycle court et de ses exigences nutritionnelles. Le haricot constitue, en outre, la principale source de protéines pour la population paysanne.

En plus de la matière organique, l'étude s'est intéressée à l'action du chaulage. En effet, l'acidité et la toxicité aluminique constituent des contraintes à la productivité des sols ferrallitiques désaturés d'altitude.

Trois essais ont été mis en place : un essai fumure organique seule ; un essai fumure organique plus 2 t/ha de chaux ; un essai chaulage plus 3 t/ha de fumier.

ESSAI FUMURE ORGANIQUE SEULE

Les résultats obtenus en première et deuxième années, saisons A et B, sont repris dans le tableau XII.

L'analyse de variance effectuée sur les quatre saisons montre que tous les traitements sont différents au seuil de 95 %, sauf les traitements T11 et T12 en quatrième saison.

TABLEAU XII
Réponse du haricot à la fumure organique (kg/ha) sans chaux
Beans production (kg/ha) under manure fertilisation without liming

Traitement	Année 1 saison A	Année 1 saison B	Année 2 saison A	Année 2 saison B	Moyenne
T ₁₁ (témoin : pas de fumier)	0	1	0	0	0
T ₁₂ (3 t/ha de fumier)	427	260	206	103	252
T ₁₃ (6 t/ha de fumier)	594	584	477	359	507
T ₁₄ (9 t/ha de fumier)	834	1043	695	597	792
C V (coefficient de variation) (%)	13,0	11,4	14,0	28,0	21,6
PPDS (plus petite différence significative)	98,7	89,8	71,9	108,8	92,3

ESSAI FUMURE ORGANIQUE EN PRÉSENCE DE 2 T/HA DE CHAUX

Interaction de la chaux et de 3 t/ha de fumier

Les résultats avec différentes doses de matière organique en présence de 2 t/ha de chaux sont donnés dans le tableau XIII.

L'analyse statistique révèle que le témoin absolu et le témoin avec chaux, mais sans fumier, ne diffèrent pas pour l'ensemble des quatre saisons. Les autres traitements diffèrent significativement entre eux au cours des trois premières saisons. Le traitement T23 (3 t/ha de fumier + 2 t/ha de chaux) se rapproche des traitements sans fumier en saison B de la deuxième année.

TABLEAU XIII
Réponse du haricot à la fumure organique (kg/ha) avec 2 t/ha de chaux
Beans production (kg/ha) under manure fertilisation with 2 t/ha of lime

Traitement	Année 1 saison A	Année 1 saison B	Année 2 saison A	Année 2 saison B	Moyenne
T ₂₁ (témoin : pas de fumier)	0	0	0	0	0
T ₂₂ (0 t/ha de fumier + 2 t de chaux)	0	2	0	0	0
T ₂₃ (3 t/ha de fumier + 2 t de chaux)	432	432	270	186	330
T ₂₄ (6 t/ha de fumier + 2 t de chaux)	794	830	507	436	642
T ₂₅ (9 t/ha de fumier + 2 t de chaux)	1031	996	714	863	901
CV (coefficient de variation) (%)	14,0	33,0	22,0	46,0	28,8
PPDS (plus petite différence significative)	99,7	122,0	102,4	194,3	129,5

Les témoins sans fumier (témoin absolu et témoin absolu + 2 t/ha de chaux) donnent des rendements nuls en toutes saisons. La fumure organique est donc l'élément clé de la mise en valeur de ces sols.

Action spécifique de la chaux

La comparaison des rendements obtenus avec les différentes doses de fumier, avec et sans chaux, donne les résultats indiqués dans le tableau XIV.

Les accroissements de rendement dus à l'action de la chaux restent faibles (6 à 14 %) et ne sont pas significativement différents des mêmes traitements sans chaux si l'on considère l'ensemble des quatre saisons. Par ailleurs, les deux tonnes de chaux ajoutées au fumier coûtent 60 000 FBU (soit l'équivalent du revenu annuel moyen par tête d'habitant, qui est de 200 dollars US).

TABLEAU XIV
Action spécifique de 2 t/ha de chaux sur les rendements du haricot (kg/ha) en présence de différentes doses de fumier
Specific effect of 2 t/ha of liming on beans yields (kg/ha) with different doses of manure

Traitement	D * année 1/A	D an. 1/B	D an. 2/A	D an. 2/B	D an. 1 et 2	Moyenne/ saison	D en (%) an. 1 et 2
0 t fumier	0	1	0	0	1	0	-
3 t fumier	5	172	63	83	323	81	14
6 t fumier	200	246	30	77	553	138	12
9 t fumier	193	- 47	9	266	421	105	6

* D = différence de rendement du traitement (n + 1) - n.

De plus, si l'on admet que le kilogramme de haricot se vend 50 FBU, le revenu tiré du surplus de production (16 000 et 28 000 FBU pour deux années) est largement inférieur au coût de l'amendement (60 000 FBU). Le chaulage se heurte donc à trois problèmes majeurs :

- la chaux n'est pas un produit courant sur le marché ;
- son coût est trop élevé (30 000 FBU par tonne) pour le paysan burundais ;
- son application ne semble pas économiquement rentable sur les cultures traditionnelles.

Courbe de réponse

Nous avons établi, avec les moyennes des quatre saisons, des courbes de réponse des rendements à la fumure organique avec ou sans chaux. Les résultats sont présentés dans la figure 5.

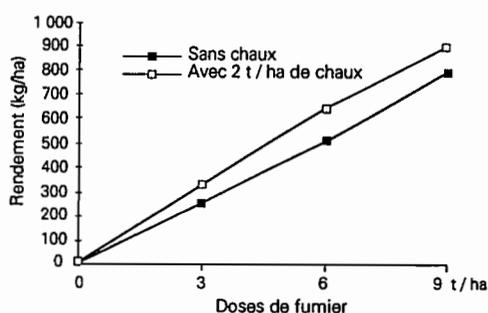


FIG. 5. — Courbe de réponse du haricot au fumier de ferme à Mashitsi.
Yields curve of bean under different doses of manure with or without liming.

On observe que, avec les doses de fumier appliquées, le plateau de la courbe de réponses théorique n'est pas encore atteint. Des doses plus importantes peuvent être envisagées ; elles entraîneraient des accroissements substantiels de rendement.

ESSAI CHAULAGE EN PRÉSENCE DE 3 T/HA DE FUMURE ORGANIQUE

Interaction avec une fumure organique de 3 tonnes de fumier

Les rendements obtenus avec différentes doses de chaux en présence de 3 tonnes de fumier sont rapportés dans le tableau XV.

L'examen de ce tableau montre que, en saison A de la première année, tous les traitements s'équivalent, sauf le témoin absolu. En deuxième saison, le traitement avec fumier mais sans chaux diffère à la fois du témoin absolu et des traitements avec chaux. Au cours des deux saisons suivantes, ce traitement se rapproche à la fois du témoin absolu et des traitements avec chaux.

Sur l'ensemble des quatre saisons, on voit que tous les traitements s'équivalent, sauf le témoin absolu dont les rendements sont nuls. Cela confirme l'importance de la matière organique.

Action spécifique des doses croissantes de chaux

On a cherché à connaître le surplus de rendement imputable aux différentes doses de chaux. Pour cela, on a comparé le témoin avec fumier seul et les traitements avec différentes doses de chaux (tabl. XVI).

TABLEAU XV
Réponse du haricot (kg/ha) à différentes doses de chaux avec 3 t/ha de fumier
Beans production (kg/ha) under different doses of liming with 3 t/ha of manure

Traitement	Année 1 saison A	Année 1 saison B	Année 2 saison A	Année 2 saison B	Moyenne
T ₃₁ (témoin absolu)	0	0	0	0	0
T ₃₂ (témoin + 3 t fumier)	593	266	77	92	257
T ₃₃ (témoin + 1 t chaux + 3 t fumier)	474	487	173	111	311
T ₃₄ (témoin + 2 t chaux + 3 t fumier)	565	634	276	123	400
T ₃₅ (témoin + 3 t chaux + 3 t fumier)	534	625	223	165	387
T ₃₆ (témoin + 4 t chaux + 3 t fumier)	476	509	206	214	351
CV (coefficient de variation) (%)	30	26	52	55	40,8
PPDS (plus petite différence significative)	170,2	185,1	122,7	93,7	142,9

TABLEAU XVI
Action spécifique de différentes doses de chaux sur les rendements du haricot (kg/ha)
Specific effect of different doses of liming on beans yields (kg/ha)

Traitement	D * année 1/A	D an. 1/B	D an. 2/A	D an. 2/B	D an. 1 et 2	Moyenne/ saison	Den (%) an. 1 et 2
0 t chaux	0	0	0	0	0	0	-
1 t chaux	- 119	221	96	19	217	50,4	5
2 t chaux	- 24	348	199	31	570	142,5	14
3 t chaux	- 59	359	149	73	519	129,8	13
4 t chaux	- 117	243	129	122	377	94,3	9

* D = différence de rendement du traitement (n + 1).

On constate d'abord que, en première saison de la première année, les différentes doses de chaux n'ont aucun effet (pas d'accroissement de rendement). Cela semble indiquer que la chaux, appliquée deux semaines avant les semis, n'est pas encore active. Les saisons suivantes, son efficacité reste médiocre (5 à 14 %).

La valeur du surplus de production (11 000 et 28 500 FBU) dû au chaulage est largement inférieure au coût des différentes doses de chaux (30 000 à 120 000 FBU). Là aussi, le chaulage se révèle non rentable.

Courbe de réponse

La courbe de réponse du haricot au chaulage est représentée à la figure 6.

Contrairement à la réponse à l'apport de fumier, elle accuse déjà un plateau aux environs de 2 t/ha de chaux, au-delà duquel les rendements semblent baisser. Les antagonismes ioniques résultant de l'augmentation des teneurs en Ca et Mg pourraient expliquer cette baisse.

Pour l'ensemble des trois essais, on a observé de fortes baisses de rendement et des coefficients de variation élevés, surtout en deuxième année. Cela pourrait s'expliquer par les sévères attaques d'antracnose et par les mauvaises conditions climatiques.

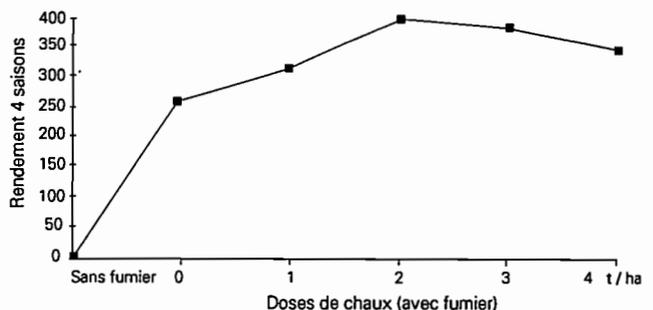


FIG. 6. — Courbe de réponse du haricot au chaulage à Mashitsi.
Yields curve of bean under different doses of liming with 3 t/ha of manure.

Évolution des propriétés du sol

Un mois après l'application des amendements, des échantillons de sol ont été prélevés et analysés. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XVII.

On observe que le chaulage augmente à la fois le pH et les teneurs en Ca et Mg. Il diminue les teneurs en aluminium et hydrogène échangeables. Les bases échangeables et le phosphore restent en basses concentrations dans tous les traitements mais semblent augmenter légèrement avec les doses de matière organique.

On peut conclure de ces trois essais que les sols ferrallitiques désaturés sont tellement pauvres et carencés en plusieurs éléments que le témoin absolu donne des rendements nuls. L'apport de matière organique induit des accroissements de rendement importants et les doses étudiées sont encore largement en dessous de l'optimum technique. Pour le chaulage, la dose optimale semble se situer autour de 2 t/ha. Mais son application est limitée par la faible capacité d'investissement du paysan et l'inopportunité économique de l'opération.

TABLEAU XVII
Fumure organique, chaulage et évolution des propriétés du sol
Manure, liming and soil properties behavior

Traitement	pH	C (%)	N (%)	C/N	Al ³⁺	H ⁺	Ca	Mg	K	Na	S base	S acide	CEC	T eff.	V (%)	V eff. (%)	I Kam (%)	P (ppm O-D)
					méq/100 g													
T ₁₁	3,9	1,31	0,1	12	1,76	0,18	0,14	0,08	0,06	0,03	0,33	1,95	4,52	2,28	7	50	84	10
T ₁₂	4,1	1,50	0,12	13,1	1,75	0,21	0,26	0,18	0,15	0,02	0,61	1,96	4,68	2,57	13	55	68	11
T ₁₃	4,4	1,69	0,13	13,5	1,23	0,22	0,50	0,35	0,31	0,04	1,20	1,45	4,96	2,65	24	53	46	35
T ₁₄	4,4	1,68	0,12	14,0	1,11	0,19	0,59	0,48	0,38	0,02	1,47	1,30	4,69	2,77	31	59	40	32
T ₂₂	4,9	1,37	0,10	13,7	0,69	0,11	0,88	0,92	0,14	0,02	1,96	0,80	3,76	2,76	52	73	24	18
T ₂₃	5,4	1,31	0,11	12,8	0,28	0,14	1,20	1,22	0,18	0,04	2,64	0,42	4,02	3,06	66	76	9	16
T ₂₄	5,2	1,39	1,11	12,6	0,19	0,10	1,37	1,42	0,26	0,08	3,13	0,29	4,45	3,42	70	77	6	29
T ₂₅	5,2	1,29	0,10	12,9	0,24	0,12	1,14	1,22	0,23	0,04	2,63	0,36	4,58	2,99	57	65	8	27

Ces conclusions semblent confirmées par d'autres résultats de recherches sur la fertilité au Burundi. Le programme Engrais de la FAO a mené une série d'essais et de démonstrations sur l'efficacité des engrais minéraux dans 47 des 78 communes que comptait le pays entre 1972 et 1982. Il a proposé des formules NPK à l'hectare pour différentes cultures vivrières sur la base de l'accroissement de la production et des revenus des agriculteurs. Les doses proposées sont faibles et se veulent adaptées aux conditions des systèmes culturaux traditionnels. Le programme ne fait aucune recommandation sur le chaulage.

L'Isabu a mis en place en 1982 un programme de recherche sur la fertilité pour étudier la mise en valeur des ressources naturelles à des fins agricoles (phosphates, carbonates et tourbes). Dans le cadre de ce programme, plusieurs études ont été menées dès 1985 sur l'effet du chaulage, de la matière organique et des engrais NPK.

Les résultats montrent que le chaulage sans apport de matière organique et d'engrais minéraux (SHEHATA, 1984) a très peu d'effet sur les rendements.

En revanche, le rôle primordial de la matière organique dans la restauration et le maintien de la fertilité des sols ferrallitiques lessivés d'altitude semble bien établi.

Les tubercules, notamment la pomme de terre et le manioc, se montrent plus intéressants que les légumineuses et les céréales et semblent mieux rentabiliser l'investissement en intrants agricoles (RUFYIKIRI, 1993 ; SIMBANANIYE, 1994).

CONCLUSION

Au terme de cette étude, il apparaît que les résidus du bananier peuvent jouer un rôle capital dans la gestion du ruissellement et dans le contrôle de l'érosion lorsqu'ils sont utilisés comme paillis, lequel contribue à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol pour autant que l'on parvienne à couvrir entièrement le sol.

Si les effets bénéfiques des résidus sont clairement établis et confirmés par d'autres auteurs, leur production en quantité suffisante reste, néanmoins, un problème majeur. Plusieurs solutions ont été proposées, notamment les plan-

tes de couverture, les haies vives, l'introduction des arbres dans l'exploitation, etc. La solution est certainement de combiner plusieurs techniques.

À cet égard, l'intensification de la production bananière et des autres cultures vivrières, notamment les tubercules, par une bonne fumure organique (déjà appliquée par les paysans), un bon contrôle phytosanitaire et le recours aux engrais minéraux NPK, l'introduction d'arbres et de haies vives contribueraient à accroître non seulement la production alimentaire mais aussi celle des résidus, pouvant atteindre 15 tha/an, utilisables comme paillis, fourrage et (ou) fumier.

Une telle production assurerait un paillis complet de 7 cm d'épaisseur (10 tonnes). Le ruissellement et l'érosion seraient réduits à moins de 1 % et 100 kg/ha/an de terre. Les propriétés physiques et chimiques s'en trouveraient fortement améliorées.

L'excédent de production remplirait les autres missions des résidus (paillage du caféier, compostage, fourrage). Lorsqu'on n'atteint pas ces productions ou si les résidus

sont prioritairement affectés à d'autres fins (fourrage), on peut opter pour une répartition raisonnée entre leurs différentes utilisations possibles (cf. tabl. VIII).

Cette approche permettra de concilier l'accroissement de la production agricole et l'amélioration des revenus des agriculteurs et se traduira par une bonne restauration de la fertilité des sols, une bonne gestion du ruissellement et un contrôle efficace de l'érosion.

Nos conclusions intéressent non seulement le Burundi mais également les régions des hauts plateaux de l'Afrique de l'Est (Rwanda, Ouganda, Tanzanie, Kenya) qui jouissent de climats semblables et pratiquent des systèmes culturels à base de bananier. Elles intéressent, en outre, les régions à climat équatorial où le bananier est exploité comme culture d'exportation. En effet, la fertilité des sols développés sous un tel climat est très dépendante de la matière organique.

Les résidus du bananier, produits en abondance dans ces exploitations industrielles, peuvent contribuer avantageusement à gérer la fertilité des sols et à en assurer la conservation.

BIBLIOGRAPHIE

- BIDOU (J.-E.) *et al.*, 1991 — *Géographie du Burundi*. Paris, Hatier.
- CERIGHELLI (R.), 1955 — *Cultures tropicales. T. I. Plantes vivrières*. Paris, Éd. Librairie J. -B. Ballière : 485-618.
- DUCHAUFOUR (H.), BIZIMANA (M.) *et al.*, 1991 — *Rapport annuel Isabu 1989-1990. Érosion*. Bujumbura, Isabu, Département des études du milieu et des systèmes de production (programme Agroforesterie, sylviculture et érosion).
- GOURDIN (J.) *et al.*, 1988 — *Répertoire analytique au Burundi. Analyses des végétaux, d'eaux, d'aliments, de composts, de calcaires, etc.* Bujumbura, Isabu, Publ. n° 128.
- FAO, 1980 — *Programme engrais et des intrants connexes (phases I et II) au Burundi. Conclusions et recommandations du projet*. Rome, FAO.
- HÉNIN (S.), MONNIER (E.), GRAS (R.), 1969 — *Le profil cultural : l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*. Paris, Masson, 332 p.
- LAL (R.), 1975 — *Role of mulch techniques in tropical soil and water management*. Ibadan, IITA, Technical Bulletin, 38 p.
- MINAGRI, 1982 — *Séminaire national des Eaux et Forêts*.
- NDAYIZIGIYE (F.), 1993 — Effets des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) sur l'érosion et les rendements des cultures en zone de montagne (Rwanda). *Bull. Réseau Érosion*, 13 : 41-49.
- NYABUHWANYA (J.), 1993 — *Contribution à l'étude de l'influence de l'érosion hydrique sur les propriétés chimiques et physiques du sol dans le Kirimiro central. Étude sur les parcelles expérimentales*. Mémoire, univ. Burundi, Facagro, 52 p.
- NTIBURUMUNSI (F.), 1988 — *Synthèse des essais engrais 1983-1988 sur les cultures vivrières à l'Isabu*. Bujumbura, Isabu, note technique.
- RISHIRUMUHIRWA (T.), 1990 — *Acquis de la recherche sur la fumure organique et minérale au sein de la CEPGL*. Bujumbura, Iraz, Publ. 90/07, 37 p.
- RISHIRUMUHIRWA (T.), 1993 — Contribution des résidus du bananier en conservation de l'eau et du sol. *Bull. Réseau Érosion*, 13 : 63-70.
- RISHIRUMUHIRWA (T.) *et al.*, 1989 — *Étude pédologique de huit sites repères pour les essais engrais au sein de la CEPGL (Moso, Mashitsi, Rubona, Karama, Yangambi, Mulungu, Gandajika, M'Vuazi)*. Bujumbura, Iraz, 78 p.
- ROOSE (E.), 1977 — *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 78, 108 p.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), GODEFROY (J.), 1977 — Pédologie actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste, sous forêt et sous bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 15 (4) : 409-436.
- ROOSE (E.), NDAYIZIGIYE (F.), 1994 — L'agroforesterie, la fertilisation minérale et la GCES au Rwanda. *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 309-325.

- RUFYIKIRI (G.), 1993 — *Gestion des sols acides en région à occupation dense : le Kirimiro au Burundi. Comparaison de quatre systèmes de mise en valeur*. Mémoire, univ. Burundi, Facagro, 54 p.
- SHEHATA (N.), 1984 — *Effet du chaulage et de la fertilisation sur le maïs dans le Mugamba*. Bujumbura, Isabu, Note technique n° 43.
- SIMBANANIYE (A.), 1995 — *Contribution à l'étude de modifications des propriétés pédochimiques des sols acides et alumino-toxiques lessivés d'altitude suite à l'apport d'amendements dolomitiques (cas de Kajondi-Bututsi)*. Mémoire, univ. Burundi, fac. Sciences, 88 p.
- SOLTNER (D.), 1975 — *Les bases de la production végétale*. T. I. Coll. Sciences et techniques agricoles.
- SYS (C.) *et al.*, 1961 — *La cartographie des sols au Congo, ses principes et ses méthodes*. Bruxelles, Ineac, Série technique n° 66, 49 p.
- USDA, 1975 — *Soil Taxonomy. Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Washington, USDA.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1978 — *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Washington, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook n° 537, 55 p.

L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso)

Une expérience de recherche-développement

Patrick DUGUÉ (1), Éric ROOSE (2) et Luc RODRIGUEZ (3)

(1) Cirad-Sar, BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1, France.
(2) Centre Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.
(3) DDAF, rue Trivalle, BP 28, 11001 Carcassonne cedex, France.

RÉSUMÉ

L'agriculture du Yatenga (Burkina) est actuellement très affectée par la dégradation des sols due en partie à l'érosion hydrique. Suite aux années de sécheresse récentes (1982-1985), le projet de recherche-développement du Yatenga a centré son intervention sur la valorisation de l'eau pluviale et l'aménagement des terroirs villageois. Pour chaque partie de la toposéquence (haut de pente, glacis, bas-fond), des techniques d'aménagement ont été testées en milieu paysan. Elles associent les aménagements physiques (cordon pierreux, demi-lune, digue filtrante) et biologiques (arbres, arbustes, graminées). La valorisation de ces aménagements par l'agriculture nécessite d'améliorer les techniques culturales. La relance de la culture attelée légère privilégiant le sarclobinage isohypse, l'amélioration de la production de fumure organique et l'utilisation raisonnée des engrais minéraux constituent les thèmes majeurs du conseil technico-économique apporté aux paysans.

Les difficultés principales rencontrées sont liées d'une part aux faibles moyens d'intervention des exploitations agricoles et d'autre part à la divagation des troupeaux en saison sèche, qui compromet les plantations. Deux méthodes complémentaires d'intervention ont été adoptées : la première, centrée sur le paysan, sa famille et son matériel, vise à aménager progressivement les parcelles de l'exploitation agricole ; la seconde consiste à appuyer des groupes de paysans organisés pour l'aménagement de portions de bassin versant (location de camions, topographie...).

MOTS CLÉS : Yatenga — Zone sahélo-soudanienne — Lutte antiérosive — Aménagement — Terroir villageois — Techniques culturales — Intensification.

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF RURAL SOILS AND THE IMPROVEMENT OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION IN YATENGA (BURKINA FASO). A RESEARCH-DEVELOPMENT EXPERIMENT

In Yatenga (Burkina), farming is currently strongly affected by the soil degradation due partly to water erosion. Following the recent drought years (1982-1985), the research-development project in Yatenga focused on the enhancement of rainy water and on the development of rural soils. For each part of the toposequence (upslope, glacis, bottom), some techniques were tested in rural zones. They combine the physical developments (stone bund, half-moon, permeable dam) and the biological ones (trees, shrubs, graminaceae). The enhancement of these developments through farming requires to improve the cultivation techniques. The revival of the slight draught cultivation favoring the on level weeding, the improvement in the production of organic manuring and the rational use of mineral fertilisers are the main themes of the technico-economic advice given to farmers.

The main difficulties observed are related on the one hand to the weak means of the farms and on the other hand to the cattle migrations during the dry season which affect plantations. Two complementary methods were used by the farmers from some villages: the first one is based on the farmer, his family and his equipment and aims at developing gradually the agricultural plots; the second one consists in helping organized groups of farmers to develop portions of hillslopes (truck rental, topography...).

KEYWORDS : Yatenga — Sahelo-Sudanese zone — Erosion control — Development — Village territory — Cultural practices — Intensification.

RESUMEN

EL APROVECHAMIENTO DE TIERRAS RURALES Y LA MEJORA DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN YATENGA (BURKINA).
UNA EXPERIENCIA DE INVESTIGACIÓN-DESARROLLO

En la época actual, la agricultura de Yatenga (Burkina) es fuertemente afectada por la degradación de los suelos debida en parte a la erosión hídrica. Después de los recientes años de sequía (1982-1985), el proyecto investigación-desarrollo de Yatenga ha sido concentrado en la valorización del agua pluvial y en el aprovechamiento de las tierras rurales. Para cada parte de la toposecuencia (pendiente arriba, glacis, bajos), algunas técnicas de aprovechamiento han sido probadas en la zona rural. Combinan los aprovechamientos físicos (cordón de piedras, media luna, dique de regulación) y biológicos (árboles, arbustos, gramíneas). La valorización de esos aprovechamientos a través de la agricultura requiere mejorar las técnicas de cultivo. El resurgimiento del cultivo con yunta ligera que favorece el caballón a nivel, la mejora de la producción de abonado orgánico y la utilización racional de abonos minerales constituyen los temas principales de los consejos técnico-económicos dados a los campesinos.

Las dificultades principales encontradas se relacionan por una parte con los reducidos medios de las explotaciones agrícolas y por otra parte con la migración de los rebaños en la estación seca que afectan las plantaciones. Dos métodos complementarios de ayuda han sido utilizados por los campesinos de algunas aldeas : el primero se funda en el campesino, su familia y sus aperos e intenta aprovechar progresivamente las parcelas de la explotación agrícola ; el segundo consiste en ayudar a los grupos de campesinos organizados para el aprovechamiento de porciones de cuenca hidrográfica (alquiler de camiones, topografía...).

PALABRAS CLAVES : Yatenga — Zona sahelosudanesa — Lucha contra la erosión — Aprovechamiento — Tierra rural — Técnicas de cultivo — Intensificación.

INTRODUCTION

Les caractéristiques physiques des sols du Yatenga (toposéquence longue, forte sensibilité à la battance...) et leur surexploitation sont les causes principales des phénomènes de dégradation observés dans cette région (nord-ouest du Burkina), l'une des plus touchées par l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Les premiers travaux de défense et restauration des sols y débutèrent en 1960 (programme Geres, 1960-1964) avec un succès très limité au regard de l'investissement consenti. Après une longue période vouée à l'intensification des systèmes de culture (vulgarisation de la culture attelée, engrais...), le développement rural s'est à nouveau consacré à la lutte contre l'érosion (programme FDR puis FEER, 1978-1985). Ce domaine d'intervention est devenu dans les années 1980-1991 prioritaire pour la plupart des structures de développement de la région (ONG, associations de paysans, projets...). C'est dans ce cadre que le projet de recherche-développement du Ya-

tenga, qui associait des structures de recherche (Inera, Cيراد) et de développement (CRPA), s'est intéressé à la lutte contre l'érosion, à l'aménagement des terroirs villageois et, d'une façon plus générale, à l'amélioration des systèmes de production agricole.

Nos propositions techniques en matière d'aménagement de terroir villageois reposent d'une part sur un travail d'expérimentation de techniques culturales et antiérosives avec les populations, d'autre part sur les acquis scientifiques obtenus dans ces domaines dans des écologies comparables. Après une présentation du contexte physique et humain, nous aborderons dans un premier temps les travaux entrepris par le projet de recherche-développement dans les domaines de l'amélioration des systèmes de culture et de la lutte contre l'érosion. Puis nous discuterons des méthodologies d'intervention expérimentées dans quelques villages en vue d'un aménagement global des terroirs villageois, afin d'en dégager les atouts et les limites.

LE CONTEXTE

Le projet de recherche-développement s'est principalement intéressé à la zone Centre-Yatenga caractérisée par une prédominance de l'agriculture sur l'élevage, une

population majoritairement mossi et une forte densité de population (50 à 80 habitants au kilomètre carré). Les villages d'étude de Ziga, Sabouna et Boukéré sont représentatifs de cette sous-région où les phénomènes d'érosion hydrique sont les plus marqués (fig. 1).

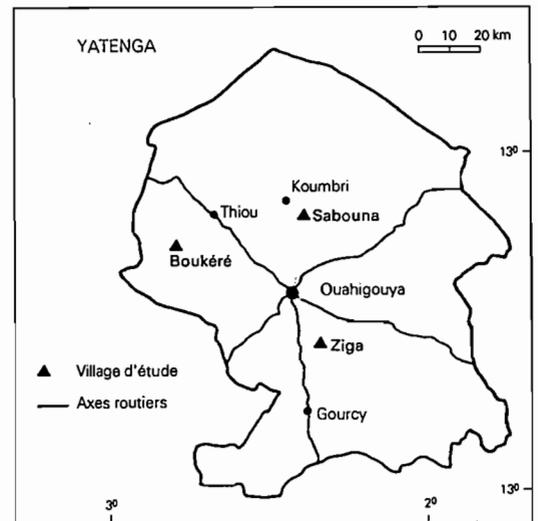
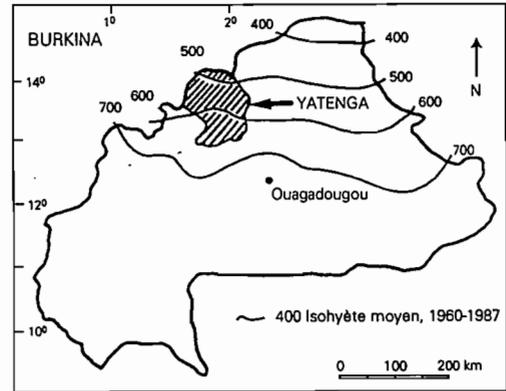
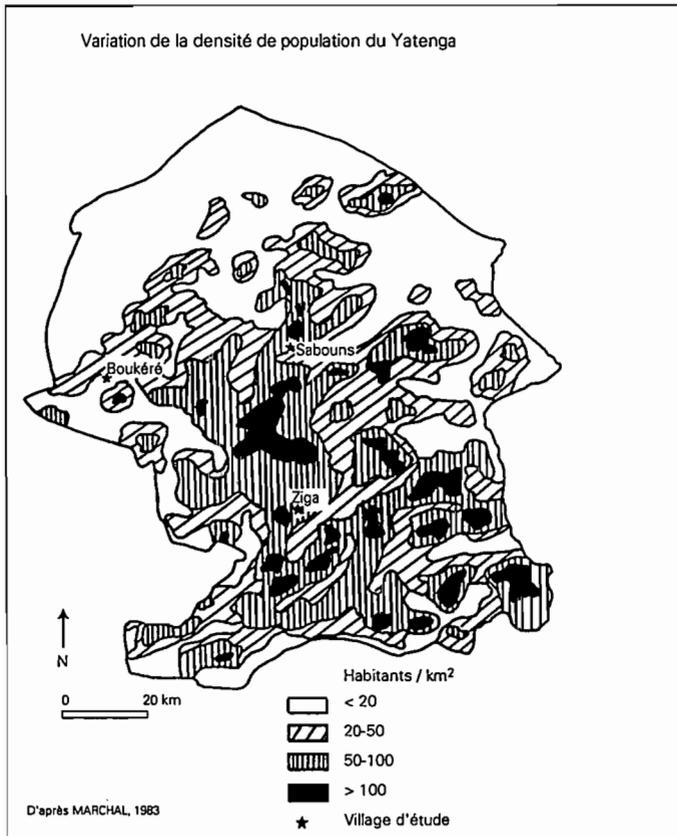


FIG. 1. — Cartes de situation et de densité démographique. Yatenga, Burkina Faso.
Location and population density maps. Yatenga, Burkina Faso.

Une agriculture en crise

Dans les villages mossis, la production céréalière constitue l'activité principale (90 % de la surface cultivée) et assure, plus ou moins bien selon les années, la nourriture de base des populations. Durant la période 1980-1990, l'autosuffisance alimentaire à l'échelle de la province n'a été atteinte qu'une année sur cinq.

La raréfaction des ressources naturelles (terre, fourrages, bois), la dégradation des sols et donc la baisse de la production agricole sont liées à deux causes principales :

— un accroissement démographique important durant les cinquante dernières années ; ainsi la densité de popu-

lation du Yatenga est-elle passée de 24 habitants au kilomètre carré en 1930 à près de 54 habitants au kilomètre carré en 1990 ;

— un renforcement des aléas climatiques caractérisé principalement par une baisse de la moyenne pluviométrique annuelle de 700 mm à 530 mm au cours des vingt dernières années.

Dans ce contexte, les paysans du Yatenga ont développé de nouvelles stratégies de production anti-aléatoires : par exemple en développant les cultures de sorgho en bas-fond (zone réservée auparavant au pâturage et à la riziculture), en privilégiant l'élevage de petits ruminants, moins risqué

et plus adapté aux pâturages dégradés que l'élevage bovin, en investissant leurs faibles revenus ou leur force de travail dans des situations agricoles moins aléatoires (exode vers le sud).

Les opérations culturales restent entièrement manuelles pour 90 % des surfaces cultivées. La culture attelée stagne et même régresse dans la plupart des cas du fait des difficultés d'entretien des bœufs de trait et de l'absence de stratégie de développement de la culture attelée au Yatenga. Dans ces conditions, un actif cultive selon ses disponibilités en terre entre 0,75 ha et 1,2 ha. Tout le temps de travail disponible en saison agricole après les semis est consacré au sarclobinage manuel des cultures jusque début septembre. La concurrence avec d'éventuels travaux d'aménagement est donc très forte (plantation d'arbres et de graminées, réparation des dispositifs antiérosifs). En saison sèche, la capacité d'intervention des paysans et de leur famille pour réaliser les aménagements ou fabriquer de la fumure organique de qualité (fumier) est très souvent limitée par l'exode temporaire et le manque de matériel (charrette, pelle, pioche...).

Les contraintes physiques de la production agricole : ruissellement, érosion hydrique et pauvreté des sols

Malgré la baisse de la moyenne pluviométrique annuelle, l'intensité des pluies est élevée et dépasse le plus souvent 80 mm/h. L'érosivité climatique est importante ($R_{USA} = 300$ à 500). Les risques de ruissellement et d'érosion sont très élevés en début de saison humide du fait de l'état de surface (sol nu encroûté) et de la couverture très partielle des sols. Les résidus de récolte, la paille de mil principalement, sont stockés dès la récolte (fourrage, combustible...) ou pâturés par les animaux en divagation durant toute la saison sèche. Dès le mois d'avril, la biomasse résiduelle couvrant le sol est négligeable. On a pu observer qu'en mars 1983 (400 mm bien répartis en 1982) il restait en moyenne 200 kg/ha de paille de mil et d'adventices sur les parcelles les plus éloignées du village, donc moins pâturées par les troupeaux. Autour des concessions, le sol est totalement nu.

Sans entrer dans la diversité des situations agropédologiques du Centre-Yatenga, il est possible d'aborder les contraintes physiques de la production agricole à l'échelle d'une toposéquence « type » (fig. 2).

En haut de toposéquence, les sols gravillonnaires ou totalement décapés (« zipellés ») ne permettent plus l'installation d'une végétation arborée et herbacée quelle que soit la pluviosité. Le coefficient de ruissellement peut atteindre 50 à 80 % durant toute la saison des pluies. Les quelques plaques de sol sableux qui subsistent çà et là se couvrent dès les premières pluies d'un maigre tapis herbacé à base de *Cenchrus biflorus* (« cramcram ») qui disparaît en début de saison sèche.

Les zones de glacis au sol sablo-argileux plus ou moins profond (50 à 100 cm) sont presque totalement cultivées. La jachère a pratiquement disparu. Du fait principalement de la longueur des pentes dépassant parfois deux kilomètres et de la sensibilité de ces sols à la battance et à l'encroûtement, les zones de glacis sont facilement sujettes à l'érosion en nappe. Celle-ci peut être plus ou moins marquée selon la texture du sol et la pente. Les zones plates ou dépressionnaires sur sol sableux profond sont peu affectées par l'érosion et peuvent porter un parc à *Faidherbia albida* malheureusement vieillissant. C'est aussi dans les zones de glacis que naît l'érosion en rigole et en ravine lorsque le ruissellement en nappe s'intensifie. Des ravines peuvent atteindre 1 à 3 m de profondeur et plus de 10 m de largeur.

Les zones de bas-fond, du fait de leur position dans la toposéquence, sont peu affectées par l'érosion. Par contre, les apports massifs d'eau de ruissellement, lorsque les pluies dépassent 20 mm, rendent leur mise en valeur et leur aménagement difficiles et coûteux.

Les sols hors bas-fond ont des caractéristiques physiques (structure, texture, teneur en matière organique inférieure à 0,7 %) qui favorisent leur érodibilité mais aussi des propriétés chimiques défavorables aux cultures : carence en phosphore assimilable (P Olsen < 15 ppm) et en azote (0,03 à 0,06 %). Ces carences se sont accentuées au fil des années du fait d'une absence de mise en jachère des sols et de très faibles apports de fumure minérale et organique. Actuellement, la fumure organique (poudrette, parcage) concerne moins de 10 % des surfaces cultivées (DUGUÉ, 1989 a).

L'utilisation des ressources naturelles et l'occupation de l'espace

L'espace agraire du Centre-Yatenga est totalement approprié et s'organise en terroirs villageois aux limites bien connues de tous (MARCHAL, 1983). La terre est historiquement répartie entre les différents lignages qui composent la population. Des systèmes de prêts pour une ou plusieurs campagnes agricoles permettent une redistribution des terres. Les parcelles prêtées sont difficilement aménageables par les paysans emprunteurs qui les exploitent ; la plantation d'arbres, la construction d'un cordon pierreux sont considérées comme des signes d'appropriation de la terre et ne sont pas donc autorisées par son propriétaire.

Les ressources provenant des zones sylvopastorales (pâturage, bois de feu...) sont utilisées par tous sans règle de gestion précise. Mais, du fait de la raréfaction de la plupart des ressources naturelles, on tend vers une appropriation de certaines de ces ressources : les pailles de mil sont de plus en plus stockées dès le mois de novembre par le propriétaire de la récolte, ce qui limite la vaine pâture... (DUGUÉ, 1985).

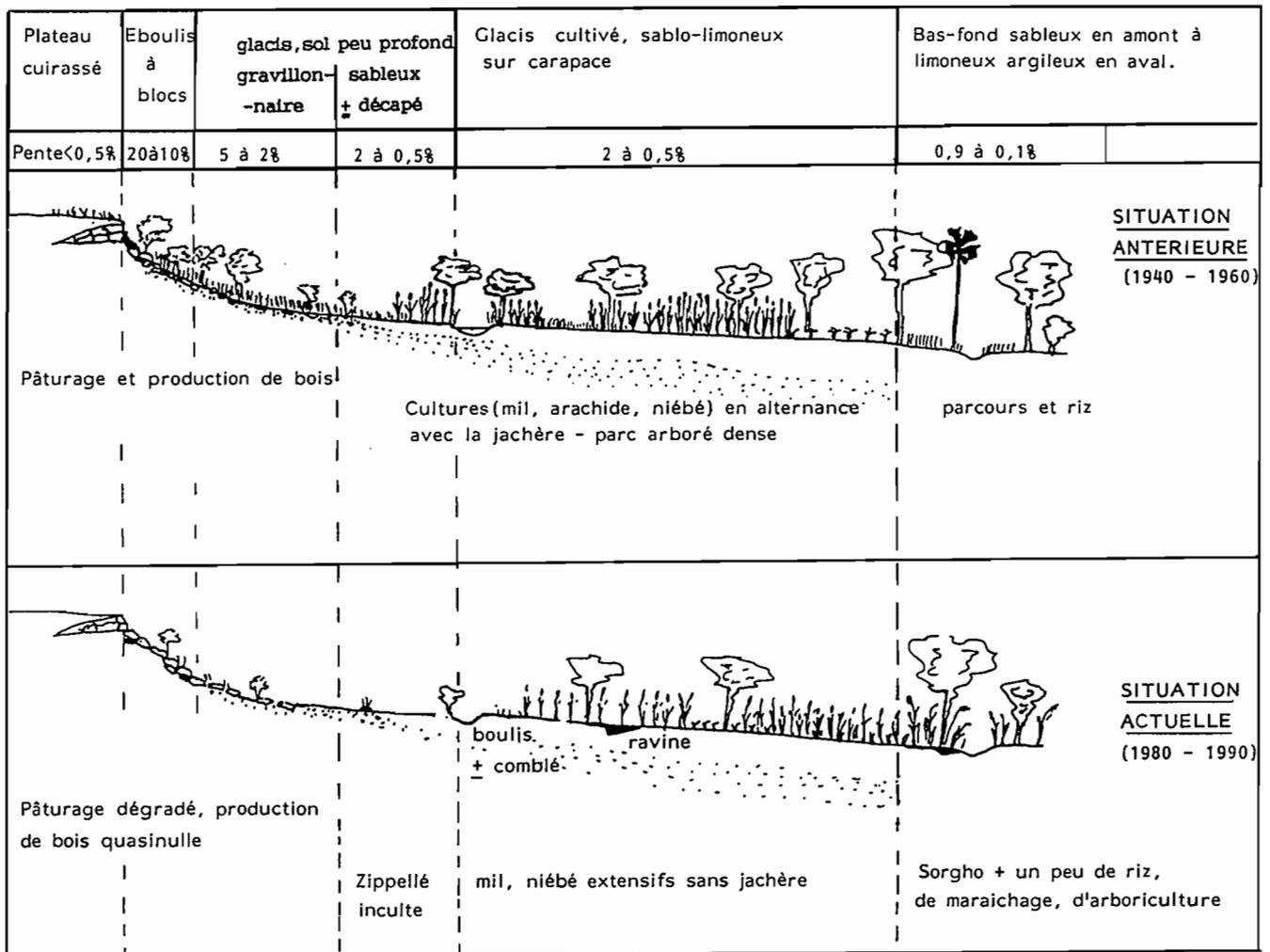


FIG. 2. — Schéma de la toposéquence type du Centre-Yatenga sur cuirasse et granite et son évolution récente.
Diagram of the type toposéquence of Central Yatenga on hardpan and granite and its recent development.

Le territoire villageois comprend, dans presque toutes les localités du Centre-Yatenga, quatre unités principales (fig. 3) :

- la zone de parcours de saison des pluies, constituée principalement des terres incultes en haut de pente et de petites surfaces en bas-fond inondables et non cultivées ;
- la zone de culture extensive, située sur les glacis plus ou moins dégradés, presque totalement cultivée et couvrant la majeure partie de l'espace agraire (de 50 à 65 % de la surface des terroirs) ;
- la zone de culture intensive autour des habitations, qui reçoit presque chaque année de la fumure organique, et couvre 5 à 10 % des surfaces cultivées ;
- la zone de culture de bas-fond, principalement cultivée en sorgho, qui correspond à environ 10 % de la surface des terroirs villageois.

LES MÉTHODES D'ÉTUDE ET D'INTERVENTION

L'objectif majeur du projet de recherche-développement était de proposer des innovations techniques et organisationnelles aux paysans et aux structures de développement afin d'accroître la production agricole sans dégrader les ressources naturelles. Ces propositions résultent de travaux d'expérimentation et d'enquêtes menés en étroite collaboration avec des groupements de producteurs. Les méthodes utilisées sont complémentaires et de trois types :

- des enquêtes à l'échelle d'unités de production visant à caractériser les pratiques paysannes, à comprendre le fonctionnement des systèmes de production et à apprécier les capacités des producteurs à adopter les innovations proposées ;
- des expérimentations agronomiques en milieu paysan à l'échelle de petites parcelles permettant d'apprécier

les relations entre les techniques culturales, la variabilité de la pluviosité, la diversité des types de sol et les productions des cultures ;

— le suivi qualitatif d'aménagements expérimentaux dans diverses situations agropédologiques et sociales.

L'objectif de ce programme de recherche-développement n'était donc pas d'étudier les processus d'érosion et de dégradation des sols mais de mettre au point avec les

populations un schéma d'aménagement des terroirs du Centre-Yatenga. Bien que la lutte contre l'érosion ait été un des axes majeurs de notre intervention, celle-ci s'intègre dans une approche plus globale visant à accroître de façon durable la production agricole et sylvopastorale : la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).

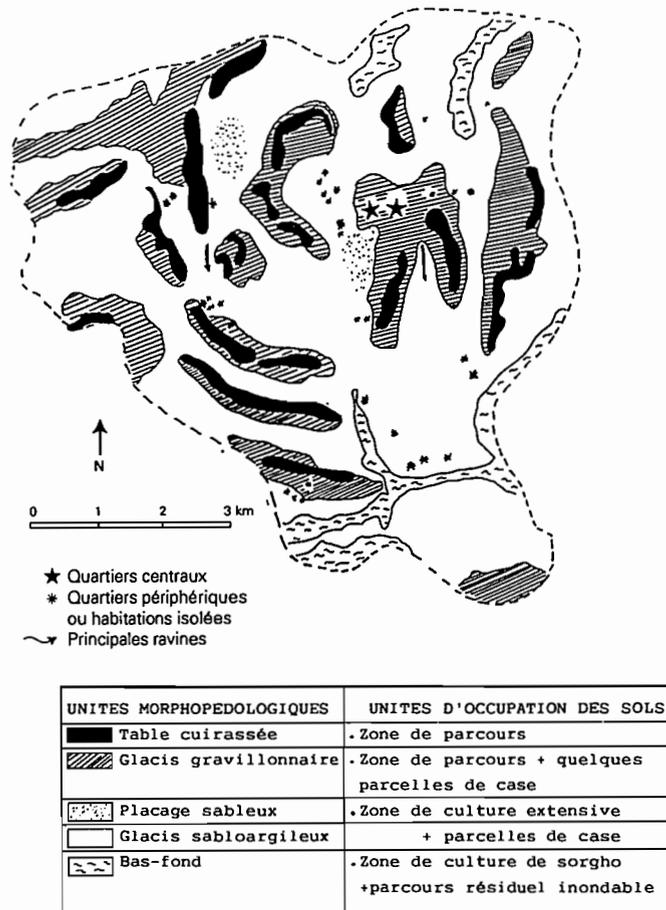


FIG. 3. — Carte simplifiée des différentes unités morphopédologiques du terroir de Ziga.
Simplified map of the different morphological soil units in the Ziga area.

L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION AGRICOLE PAR UNE MEILLEURE GESTION DE L'EAU ET DES NUTRIMENTS

De la parcelle au bassin versant : l'évolution des propositions techniques

Nos premiers travaux (1982-1985) ont porté essentiellement sur l'amélioration des systèmes de culture par l'introduction de techniques culturales, de types de fumure et de variétés *a priori* plus performantes.

Sur les parcelles d'expérimentation en milieu paysan, les gains de production en mil dus au travail du sol et à

la fertilisation minérale et organique (100 kg/ha d'engrais 14-23-14 et 5 t/ha de fumier) peuvent atteindre 300 kg/ha si l'on exclut les parcelles de case et de bas-fond (tabl. I). Mais ces résultats sont très variables selon le type de sol et la répartition des pluies.

L'effet du travail du sol peut être bénéfique aux cultures dans les sols profonds et, en année humide, dans les sols dégradés ou peu profonds. Mais on ne dispose pas de données sur l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques de ces types de sol sous l'effet de labours répétés. L'hypothèse d'une accélération de la minéralisation

de la matière organique du sol sous l'effet d'un travail du sol profond (labour à 12-15 cm) reste à prouver. En fait, le labour favorise d'une part la prolifération de la microflore consommatrice d'éléments organiques, et d'autre part le développement du système racinaire de la culture, source de matière organique (exsudats racinaires, racines

mortes...) (PIERI, 1989). Par ailleurs, le travail du sol (principalement le labour) peut créer un horizon superficiel très meuble et donc très sensible à l'érosion. Cela est couramment observé lorsque le labour est réalisé sur un sol peu humide avec un front d'humectation à 10-15 cm de profondeur.

TABLEAU I
Gains de rendement en mil obtenus par le labour et la fumure minérale (100 kg/ha de 14-23-14) dans les essais paysans (1982-1987). D'après DUGUÉ, 1989 a
Improved yields in millet obtained through ploughing and mineral manuring (100 kg/ha of 14-23-14) in rural tests (1982-1987). After DUGUÉ, 1989 a

Conditions de milieu climat + terrain	Critères d'appréciation de la pluviosité ETR/ETM (2)	Témoin non fertilisé + semis direct (kg/ha)	Gains dus au labour par rapport au semis direct (kg/ha)	Gains dus à la fumure minérale par rapport au témoin non fertilisé (kg/ha)
Pluviométrie très déficitaire mal répartie (1984) - tout type de terrain hors bas-fond	< 0,75	0-200	0	0
Pluviométrie déficitaire - terrain dégradé (3) - terrain peu profond - terrain profond	0,75 < - < 0,90	0-200 0-200 200-400	+ 200 à 350 0 + 200 à 400	0 0 + 200 à 300
Pluviométrie favorable - terrain peu profond - terrain dégradé - terrain profond	> 0,90	300-400 200-300 400-600	+ 0 à 100 + 100 à 300 + 200 à 300	+ 200 à 300 + 200 à 300 + 400 à 600

(1) Intervalle des gains obtenus par condition de milieu entre 1982 et 1987.

(2) ETR/ETM cycle (évapotranspiration réelle/évapotranspiration maximale) pour une culture de mil semée sous la première pluie supérieure à 15 mm après le 20 juin sur un sol utile = 90 mm.

(3) Terrain dégradé : terrain sablo-argileux très sensible à la battance, horizon de surface en cours de décapage.

L'amélioration des rendements par l'emploi des techniques d'intensification est significative lorsque les conditions d'alimentation hydrique sont satisfaisantes (sol assez profond, au moins 80 cm, ETR/ETM > 0,9). Mais, dans les situations où le ruissellement et l'érosion sont intenses, on note d'une part une perte en eau importante préjudiciable aux cultures même en année à pluviométrie satisfaisante et d'autre part une mauvaise installation de la culture (déchaussement des jeunes plants, pertes en éléments minéraux et organiques en cas d'apports de fumure...).

L'adoption de ces différentes innovations par les paysans reste limitée du fait de leur faible capacité d'investissement (matériel, animaux de trait, engrais...). De plus, la rentabilité de ces investissements reste aléatoire dans les conditions agropédologiques et climatiques courantes du Yatenga. Face à ce constat et suite à la campagne agricole de 1984, marquée par une extrême sécheresse et désastreuse pour les populations, nous avons réorienté no-

tre intervention en prenant en compte la lutte contre l'érosion et la valorisation de l'eau pluviale.

Principales techniques de lutte contre le ruissellement et l'érosion expérimentées et mises en œuvre par les paysans

LES AMÉNAGEMENTS ISOHYPPSES À BASE DE CORDONS PIERREUX

L'objectif premier d'un aménagement au Yatenga est d'accroître le stock d'eau dans les sols cultivés, d'une part en limitant la vitesse de ruissellement, d'autre part en augmentant l'infiltration de l'eau et la capacité de rétention du sol (travail du sol, fumure organique...). Un des corollaires à ces deux types d'intervention est la réduction de l'érosion.

La mise au point du référentiel technique a concerné dans un premier temps les parcelles cultivées (les glacis érodés) et le réseau de ravines qui s'y développe. Il s'inspire d'une part des pratiques paysannes anciennes comme les alignements de pierres sur les fortes pentes (5 à 15 %),

le repiquage de *Andropogon gayanus* en bordure de parcelle (ROOSE, 1992) et d'autre part de l'expérience acquise par des structures de recherche et de développement travaillant au Yatenga depuis plusieurs années (Oxfam, AFVP, Orstom...).

Les cordons pierreux constituent la base de l'aménagement antiérosif. Constitués de blocs de cuirasse disposés selon les courbes de niveau, ces obstacles filtrants ralentissent le ruissellement, et permettent ainsi de mieux répartir l'eau sur la parcelle (fig. 4). On n'observe plus d'excès d'eau en amont des ouvrages, comme c'est le cas

pour les diguettes en terre ; excès préjudiciable aux cultures et créant des brèches dans les ouvrages en cas de fortes pluies. La disposition des cordons se fait selon des règles facilement compréhensibles par les paysans et avec un matériel peu onéreux (niveau à eau ou niveau A) (RODRIGUEZ *et al.*, 1990). Afin de faciliter le passage d'outils de culture attelée nécessitant un semis en ligne, la courbe de niveau principale située au milieu de la parcelle est lissée. Il se constitue ainsi des bandes de terrain de 30 à 50 m de largeur selon la pente, facilement cultivables avec la traction animale.

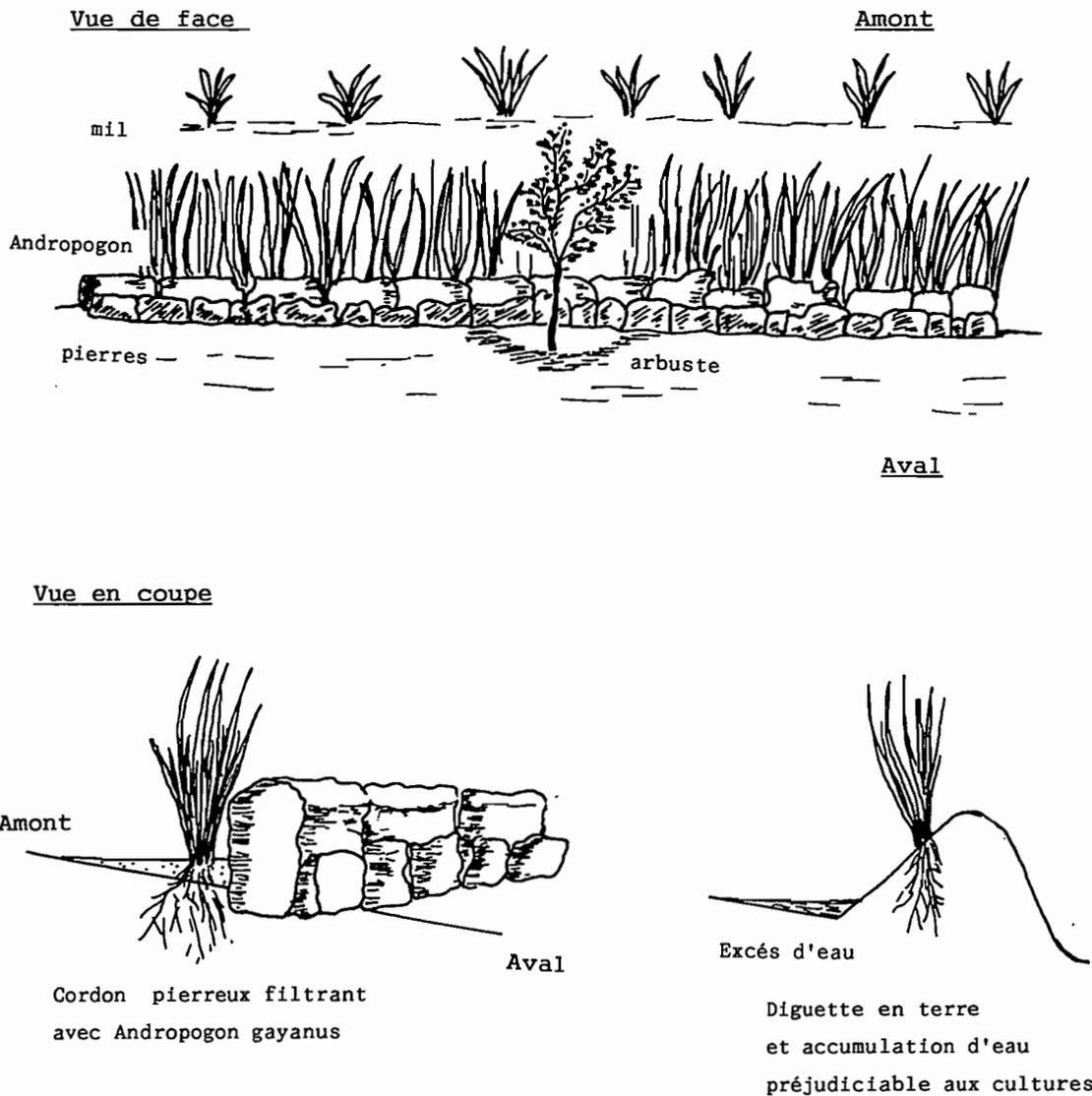


FIG. 4. — Cordons pierreux isohypses avec plantation d'arbres et de *Andropogon gayanus*.
On level stone bunds planted with trees and *Andropogon gayanus*.

Les recherches menées à Bidi par une équipe pluridisciplinaire de l'Orstom ont montré l'intérêt et les limites des aménagements à base de cordons pierreux (SERPANTIE et LAMACHÈRE, 1990). On retiendra de ces travaux que :

— ces aménagements isohyphes réduisent notablement l'érosion, la réduction des pertes en terre variant de 35 à 70 %, en comparaison avec une parcelle témoin ;

— ce type d'aménagement a un effet plus limité sur le ruissellement lorsque le sol est lisse du fait du passage à certains endroits préférentiels des eaux ruisselantes à travers les cordons pierreux ; d'où l'intérêt de cloisonner ces cordons par des levées de terre de 4 m tous les 10 m afin de limiter les déplacements latéraux (difficilement compatibles avec la culture attelée) ;

— globalement, l'aménagement testé entraîne un gain de production de grain de mil de 11 à 81 % au profit de la parcelle aménagée, variable selon le volume et la répartition des pluies. Sauf en année humide, où l'excès d'eau sur la parcelle dû à l'aménagement et à l'enherbement subséquent peut avoir un effet dépressif sur la culture.

LES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DE L'ÉROSION EN RIGOLE ET EN RAVINE

Lorsque le ruissellement s'organise en rigole ou en ravine, les cordons pierreux sont renforcés aux passages de celles-ci par des ouvrages en pierres : muret, digue filtrante. Ces ouvrages doivent suivre fidèlement la courbe de niveau dans la ravine. Lorsque la ravine n'est pas trop importante, on a préféré travailler avec des grosses pierres bien disposées, calées dans le sol, plutôt qu'utiliser des gabions très coûteux (10 000 à 15 000 F CFA par gabion). Les ouvrages en gabions ont été réservés au traitement des grosses ravines (1 à 2 m de profondeur, 4 à 10 m de largeur) et à la construction de radiers.

L'ENTRETIEN ET LA VÉGÉTALISATION DES OUVRAGES ANTIÉROSIFS

La pérennité des ouvrages en pierres — cordons pierreux, murets, digues — dépend de leur entretien. Les pierres peuvent se déchausser et créer une brèche. Par ailleurs, l'atterrissement en amont des ouvrages peut être important ; les pierres peuvent s'enfoncer dans les sols sableux humides sous l'effet de leur poids. Ainsi, le niveau moyen des cordons pierreux diminue et le dispositif antiérosif devient de moins en moins efficace. Afin de pérenniser les ouvrages en pierres, un certain nombre de tests de végétalisation ont permis de sélectionner les espèces herbacées et ligneuses les plus performantes.

Andropogon gayanus constitue la graminée pérenne la plus efficace au Yatenga ; de plus, elle est autochtone et très appréciée des populations comme matériau de construction (toits, palissades, nattes...). Des techniques de se-

mis direct ont été mises au point (RODRIGUEZ *et al.*, 1990) et sont efficaces en amont des ouvrages en pierres, là où s'accumulent l'eau de ruissellement et des nutriments organo-minéraux.

Des arbres ou arbustes peuvent être plantés en aval des ouvrages et profiter aussi de ces conditions favorables de développement. Les ligneux peuvent être conduits en haie vive (*Bauhinia rufescens*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia nilotica*) dans un double objectif de consolidation de l'aménagement physique et de production (fruits, fourrages foliaires). Des arbres isolés (*Sclerocaria birrea*, *Faidherbia albida...*), plantés avec un écartement de 5 m en aval des cordons pierreux, reconstitueront le parc traditionnel aux avantages multiples : restitution des feuilles au sol, limitation de l'érosion éolienne, production de bois, de fruits et de fourrages. La plantation d'arbres isolés s'est avérée mieux acceptée par les paysans que l'installation de haies vives car moins gênante pour les cultures et moins coûteuse en temps de travail.

LES AUTRES TECHNIQUES ANTIÉROSIVES EXPÉRIMENTÉES EN ZONE CULTIVÉE

La construction d'ouvrages en pierres est facilement réalisable par un paysan et sa famille qui disposent d'une charrette lorsque le gisement de pierres se situe à moins d'un kilomètre de la parcelle. Dans le cas contraire, il faut avoir recours à un camion donc à l'appui d'un service ou d'un projet de développement. Face à ces contraintes, plusieurs alternatives aux cordons pierreux ont été testées. Des dispositifs à base de diguettes en terre, de bandes enherbées et d'andains de paille ont été expérimentés dans différents sites. Ils ont été conçus sur le même principe que les cordons pierreux : ralentir le ruissellement sans créer d'accumulation d'eau (fig. 5). Le dispositif semi-filtrant associant des diguettes en terre et des seuils en pierres ou de végétaux s'est avéré fragile car l'eau de ruissellement s'écoule préférentiellement au contact terre-seuil, créant ainsi des rigoles.

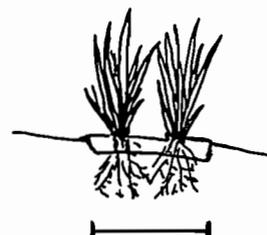
L'installation de bandes enherbées de *Andropogon gayanus* de faible largeur (0,5 à 1 m) par un travail du sol superficiel et un semis direct est une technique performante et rapide. Mais, dans les zones les plus ruisselantes, les jeunes pousses de *Andropogon* ont beaucoup de mal à se développer (sol compact, mauvaise levée, déchaussement des plantes...). L'efficacité de ces bandes de *Andropogon* les années suivantes dépend de l'entretien du dispositif (regarnissage) et du contrôle de la coupe et du pâturage de ces graminées pérennes. La mise en place d'andains de paille stabilisés par les chaumes de deux lignes de sorgho (fig. 5) constitue une technique intéressante de réduction du ruissellement et d'apport de matière organique. Mais sa mise en œuvre se heurte actuellement à la divagation des troupeaux, grands consommateurs de résidus de récolte, en saison sèche.

a) bandes enherbées d'Andropogon gayanus

AMONT

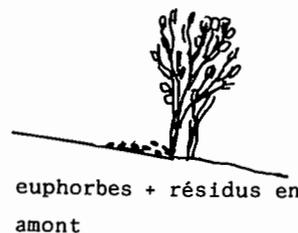
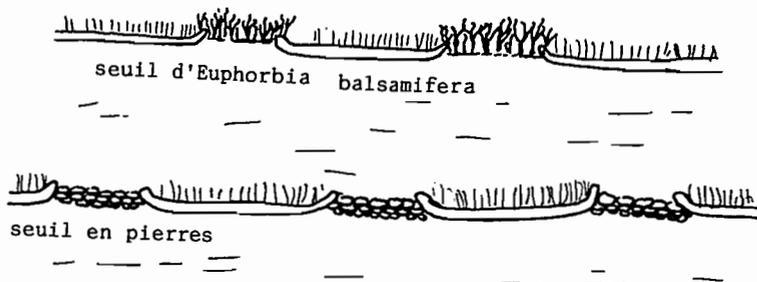


AVAL



0,5 à 0,75 m
zone travaillée et semis
direct ou repiquage d'andropogon

b) diguettes en terre avec seuils filtrants en quinconce

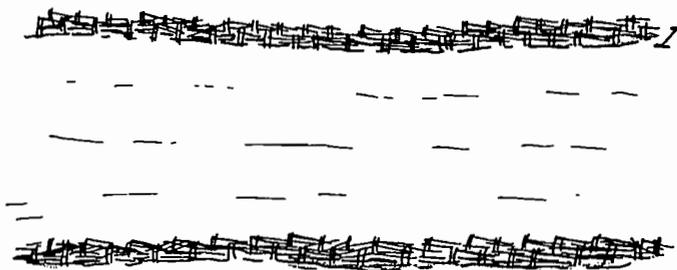


euphorbes + résidus en
amont



diguette en terre
+ andropogon

c) andains de pailles de mil et de sorgho



pailles tige de sorgho
andainées laissée en place

VUE DE FACE

VUE EN COUPE

FIG. 5. — Les dispositifs antiérosifs sans cordons de pierres : bande enherbée de *Andropogon*, diguette en terre avec seuils filtrants en quinconce, andains de paille avec tiges de sorgho.
The protective equipment against erosion without any stone bund: grass barrier of Andropogon, soil ridge with permeable check dam in alternate rows, straw windrows with sorghum stems.

LES AMÉNAGEMENTS EN AMONT ET EN AVAL DES GLACIS CULTIVÉS

La plupart des travaux d'expérimentation de techniques antiérosives en dehors des glacis cultivés ont concerné les hauts de toposéquence sur deux types de sol principalement ; les sols gravillonnaires peu profonds et les sols argilo-sableux décupés, compacts et quasi incultes (« zipellés » en mooré).

Les essais de réhabilitation de ces sols ont porté sur la régénération de la strate herbacée et la remise en culture lorsque le sol était suffisamment profond. Les tests de régénération d'un couvert herbacé, basés sur le passage d'une dent de sous-soleuse en motorisation ou en traction animale, ont donné peu de résultats sur sol squelettique et gravillonnaire. De meilleurs résultats ont été obtenus avec la technique des demi-lunes qui concentrent l'eau de ruissellement. Un travail du sol superficiel par piochage manuel de la demi-lune et un ensemencement en graminées annuelles (*Schoenefeldia gracilis*, *Penisetum pedicellatum*) favorisent l'implantation d'une nouvelle végétation.

Sur les zipellés au sol suffisamment profond (plus de 60 cm sans horizon gravillonnaire), une remise en culture est envisageable après la réalisation des cordons pierreux qui vont freiner la lame ruisselante. La technique traditionnelle du « zaï » permet d'obtenir dès la première année une récolte de mil ou de sorgho et favorise la pousse des ligneux (voir p. 159-173). Le sol compacté est travaillé manuellement en saison sèche, à la daba, autour des futurs poquets de céréales sur une profondeur de 15 à 20 cm et un diamètre de 20 à 40 cm. Cette terre meuble est enrichie de fumier ou de poudrette de parc qui attire les termites dès la première pluie. La cuvette ainsi créée a aussi pour fonction de stocker l'eau de ruissellement. Un paysan peut ainsi récupérer un demi-hectare par saison sèche, en investissant 300 heures de travail et quinze charrettes de fumier (3 t/ha). Afin de diminuer le temps de travail et sa pénibilité, le passage croisé (0,80 m x 0,80 m) d'une dent de travail du sol en sec, en traction bovine, permettra d'entamer le travail de creusage qui se poursuivra manuellement (ROOSE et RODRIGUEZ, 1990 ; FORNAGE, 1993).

L'importance du ruissellement sur ces impluviums dégradés entraîne en aval des mares temporaires surcreusées traditionnellement par les paysans (« bouli »). À partir de cette expérience, nous avons proposé à quelques paysans de creuser leur propre microretenue dans des situations propices : en aval d'impluviums dégradés ou en bordure de ravine. D'une capacité de 300 à 1 000 m³, ces microretenues permettent de diminuer le ruissellement en aval et peuvent avoir différentes utilisations : abreuvement des animaux, irrigation d'appoint en saison des pluies. L'irrigation de complément sur un petit périmètre (0,1 à 0,25 ha) est coûteuse en matériel et entre en concurrence avec les travaux agricoles sur les parcelles extensives de mil. De

ce fait, l'intérêt des paysans pour cette innovation est resté très limité (DUGUÉ, 1986).

L'aménagement des zones basses (bas-fond et bordure de bas-fond) vise à mieux valoriser l'eau de ruissellement qui, après les fortes pluies, s'y trouve en excès. Cela implique l'installation de structures coûteuses (barrage, digue filtrante avec gabions) qui génèrent un surplus de rendement en riz ou sorgho sur de très faibles surfaces en comparaison des possibilités d'aménagement sur glacis. La redistribution des terres ainsi aménagées par un groupement de paysans peut s'opposer au pouvoir foncier traditionnel. Cela explique que nous ayons axé notre intervention sur les glacis cultivés qui concernent toutes les exploitations agricoles. Il ne faut pas toutefois occulter l'intérêt d'un aménagement de bas-fond pour son action de rechargement de la nappe phréatique et donc d'installation de jardins maraîchers de saison sèche (LAMACHÈRE *et al.*, 1993).

Les pratiques agricoles et les techniques culturelles associées aux travaux d'aménagement

L'amélioration des techniques agricoles a pour objectif d'une part de valoriser le surplus d'eau obtenu grâce aux aménagements et d'autre part d'améliorer l'efficacité de ces derniers (accroissement de la rugosité).

LE TRAVAIL DU SOL ET LA CULTURE ATTELÉE

L'aménagement des parcelles de culture en bandes plus ou moins parallèles de 30 à 50 m de largeur permet une utilisation rationnelle de la culture attelée. Vu les faibles capacités d'investissement des paysans du Centre-Yatenga, la régression de l'élevage bovin et la nécessité d'implanter rapidement les cultures, nous nous sommes orientés vers des techniques « légères » de culture attelée : traction asine ou monobovine, opérations mécanisées après le semis. Il apparaît ainsi que la généralisation du semis en ligne et du sarclobinage mécanisé isohypse permettrait d'accroître l'efficacité des aménagements antiérosifs, mais surtout de limiter les pertes en eau en maîtrisant les adventices. De plus, la mécanisation du sarclage libère du temps pour des travaux agroforestiers de saison des pluies (plantation, repiquage) essentiels à la pérennité des aménagements.

En traction bovine, le labour réalisé dans de bonnes conditions (sol humide, parcelle aménagée) reste la technique de préparation du sol la plus performante du fait de son rôle bénéfique pour la capacité de rétention en eau du sol et pour l'enracinement des cultures (NICOU *et al.*, 1987). Mais la rareté des pluies en début de cycle et le temps de travail nécessaire pour la réalisation (quatre jours pour un hectare) rendent cette technique très peu opérationnelle au Yatenga. Les risques d'accroissement de l'érosion liés au travail du sol et aux passages répétés d'outils de sarclobinage en culture attelée ne sont pas à

négliger ; mais dans notre cas ils sont difficiles à évaluer en l'absence de dispositifs de mesure précis (case d'érosion de faible superficie). Ces risques sont fonction de la pente, du type de sol, de la qualité du travail (humidité du sol, profondeur, sens par rapport à la pente).

Une des solutions testées est le travail du sol en sec réalisé par une seule dent tirée par une paire de bœufs (LE THIEC, 1990). L'efficacité de cette technique varie selon le type de sol (plus ou moins argileux et compacté en surface) et la force de travail des animaux de trait. Les gains de production enregistrés restent assez faibles en général (+ 70 kg/ha en 1987) lorsque cette technique n'est pas associée à une fumure organique. Elle a surtout un intérêt pour la réhabilitation des sols dégradés (zipellés) que les paysans souhaitent remettre en culture. Dans ce cas, le passage croisé d'une dent de sous-soleuse en traction bovine est toujours associé à un apport localisé de fumure organique (FORNAGE, 1993). L'adoption et la vulgarisation du travail du sol en sec dépendent essentiellement de l'évolution de la traction bovine au Yatenga.

LA FERTILISATION DES SOLS ET LA GESTION DE LA BIOMASSE

Du fait des carences en phosphore et en azote des sols cultivés, la réponse des céréales à l'engrais minéral est très satisfaisante si la culture n'est pas affectée par un stress hydrique durant la période montaison-remplissage du grain. Malgré la mise en place de crédits de campagne auprès d'une cinquantaine d'exploitations agricoles des trois villages d'étude, la consommation d'engrais minéral n'a jamais dépassé en moyenne 150 kg par exploitation (40 % des exploitations suivies n'ont pas utilisé d'engrais). En dépit des progrès réalisés grâce aux aménagements antiérosifs, les paysans considèrent que la fumure minérale reste un investissement risqué et trop soumis aux aléas pluviométriques.

L'apport de fumure organique est une pratique traditionnelle qui peut être améliorée et développée. Actuelle-

ment, l'utilisation de la fumure organique reste très limitée du fait des faibles disponibilités en fumier et poudrette. Pour les trois villages d'étude, au moins 67 % des exploitations agricoles disposaient de moins de trois tonnes de fumier par an ; quantité pouvant fertiliser 0,6 ha de céréale à la dose de 5 t/ha (la superficie moyenne d'une exploitation est de 6 ha environ). Des possibilités d'augmenter les quantités de fumure organique ont été testées : transformation au champ des pailles de mil en compost et fabrication de fumier par adjonction de litière de paille de mil. Mais l'adoption de ces innovations techniques se heurte aux faibles disponibilités en paille de mil. Par ailleurs, on dispose de peu de données sur le bilan de la transformation du mélange paille (90 %) plus poudrette (10 %) en compost ; la perte en matière sèche est estimée à 40 %, mais on connaît mal les pertes en éléments minéraux par lessivage et gazéification.

Le développement d'un élevage intégré et stabulé au moins une partie de l'année serait le meilleur atout pour un accroissement de la quantité de fumure organique. Cela impliquerait d'améliorer le bilan fourrager actuel à l'échelle du terroir villageois et donc d'entreprendre un important travail de restauration des pâturages herbacés et ligneux. L'autre voie d'amélioration serait d'accroître de façon significative la production de paille de mil dans les parcelles aménagées par l'emploi raisonné de la fumure organo-minérale sur cette culture (à quels prix et avec quels mécanismes d'aide aux paysans : subventions, crédits... ?).

Stratégies paysannes et propositions techniques

L'aménagement des parcelles cultivées constituait la base d'un programme d'appui et de conseil à une cinquantaine d'exploitations agricoles. De 1985 à 1987, la surface aménagée par an est passée de 34 ha (0,63 ha par exploitation) à 79,5 ha (1,46 ha par exploitation) (tabl. II).

TABLEAU II
Évolution de la surface aménagée annuellement de 1985 à 1987
par un échantillon d'exploitations agricoles suivies. D'après DUGUÉ, 1989 b
*The developed area observed annually from 1985 to 1987
through a sample of farms. After DUGUÉ, 1989 b*

Village d'étude	Sabouna	Boukéré	Ziga	Total
Nombre d'exploitations suivies	21	13	19	53
Surface aménagée en 1985 (ha) Moyenne par exploitation (ha)	10,5 0,5	8,5 0,65	15 0,80	34 0,63
Surface aménagée en 1987 (ha) Moyenne par exploitation (ha)	28 1,2	24 1,77	27,50 1,45	79,5 1,46
Progression 1985-1987 (%)	+ 166	+ 182	+ 83	+ 133

La technique des cordons pierreux était retenue par tous les paysans. Mais on a pu observer qu'un tiers des surfaces aménagées concernait des terres dégradées abandonnées et anciennement cultivées. Les paysans ont surtout mis l'accent sur la régénération des sols et l'amélioration des parcelles très érodées dans un objectif d'accroissement des surfaces cultivées. Cette extensification des systèmes de culture correspond bien aux stratégies anti-aléatoires développées depuis toujours dans ce type de milieu.

Très peu de paysans ont initié un aménagement global de leur parcellaire et une intensification de leur système de culture : le repiquage et le semis de *Andropogon* ont été peu développés (quelques centaines de mètres par paysan) ; la plantation d'arbres a été limitée par l'absence de pépinière villageoise et la divagation des animaux en saison sèche ; la fabrication de compost et de fumier a été entreprise par moins de la moitié des paysans suivis. En revanche, le semis en ligne et le sarclage mécanique ont été fortement appréciés par les chefs d'exploitation, dont un grand nombre a acquis des rayonneurs et quelques-uns des houes sarcleuses. Ce dernier point correspond à la fois à une stratégie d'extensification (sarcler le plus de terre possible) lorsque le foncier cultivable est disponible et, dans le cas contraire, à une intensification du système de culture (meilleure maîtrise des adventices, binages répétés donc perte en eau moindre...).

DE L'EXPLOITATION AGRICOLE À L'AMÉNAGEMENT DU TERROIR VILLAGEOIS

Les limites d'une intervention à l'échelle de l'exploitation agricole

La vulgarisation des techniques d'aménagement entreprise de 1984 à 1987 au sein des exploitations agricoles a fait apparaître deux contraintes majeures limitant l'efficacité des travaux réalisés :

— les travaux de végétalisation des ouvrages antiérosifs et de régénération des parcours sont compromis par la divagation des animaux en saison sèche ; tous les ligneux testés sont appâtés au stade juvénile ; dans ce domaine, une gestion collective de l'espace agraire et des déplacements des troupeaux est donc indispensable ;

— l'aménagement des ravines situées le plus souvent entre deux parcelles est généralement négligé par les paysans ; lorsque la ravine est profonde, la mobilisation d'un groupe important de paysans est indispensable pour la réalisation des digues filtrantes ; d'une manière générale, un aménagement réalisé sur une surface importante (de 50 à 200 ha), donc par un groupe de paysans (vingt à cinquante personnes), est beaucoup plus efficace et durable qu'un aménagement de parcelles dispersées dans le paysage (fig. 6).

Pour ces deux raisons et pour valoriser l'appui humain et logistique du projet (location de camions, achat de charrettes), une démarche participative associant les techniques d'aménagement, la formation des paysans et leur organisation a été initiée à partir de 1987.

L'aménagement intégré de quartiers de culture

Étant donné l'importance des problèmes d'érosion et la taille des villages (800 à 3 000 habitants), une approche par petites unités d'intervention (50 à 200 ha) correspondant à des « quartiers de culture » a été préférée à une planification globale des aménagements à l'échelle du terroir villageois (800 à 3 200 ha).

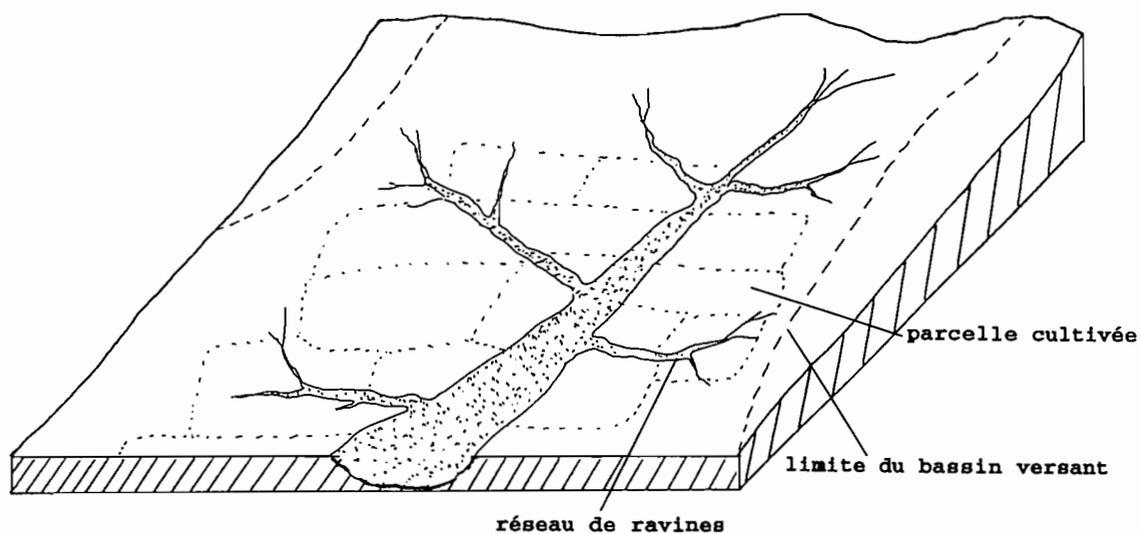
LA RÉALISATION DES AMÉNAGEMENTS

Les propriétaires et utilisateurs des parcelles d'un même quartier de culture (portion de bassin versant) se constituent en groupement d'aménagement et sollicitent l'appui du projet de recherche-développement. La première saison sèche est consacrée à la réalisation des cordons pierreux dans les parcelles cultivées. Chaque paysan du groupement s'engage à réaliser un aménagement sur une de ses parcelles déjà cultivées ou qu'il souhaite remettre en culture. Le projet apporte son appui à la réalisation de ces aménagements en prêtant un camion pour le transport collectif des pierres, du petit matériel (pioches, barres à mine) et en aidant les paysans à tracer les courbes de niveau. Durant la saison de culture, les paysans exploitent leurs champs (aménagés ou non) et consacrent quelques journées à la végétalisation des ouvrages antiérosifs : semis et repiquage de *Andropogon*, plantation d'arbres et d'arbustes.

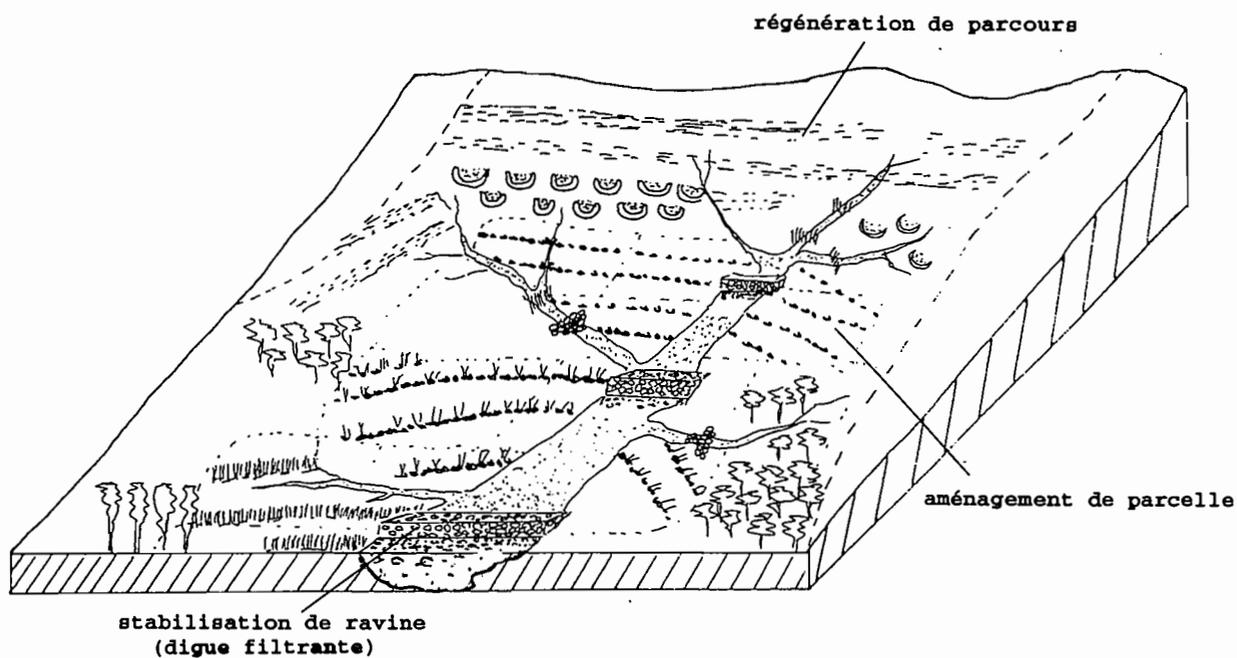
Au cours de la saison sèche suivante, la zone aménagée, et délimitée à l'aide de marques de peinture, est mise en défens. Cela permet aux arbres plantés de prospérer normalement, aux régénérations naturelles de ligneux de survivre et aux pâturages herbacés ainsi qu'aux jeunes pieds de *Andropogon* de ne pas être surpâturés. L'aménagement se poursuit la deuxième année selon le même schéma et peut être achevé la troisième année. Dans le cadre des relations contractuelles avec le projet, les groupements paysans se sont engagés à faire respecter la mise en défens durant la deuxième année.

L'aménagement du quartier de culture intéresse prioritairement les parcelles cultivées. Les interventions hors zones cultivables sont très limitées (quelques reboisements individuels). Les paysans ne sont pas actuellement intéressés pour intervenir sur les parcours en haut de pente (demi-lunes...). Ces zones profitent tout de même de la mise en défens.

Cet aménagement s'accompagne de la vulgarisation de techniques d'amélioration de la production céréalière issues du référentiel technique évoqué précédemment : semis en ligne et sarclage mécanique selon les courbes de niveau, compostage des pailles, emploi raisonné d'engrais.



Avant aménagement



Aménagements réalisés ou en cours

FIG. 6. — Aménagement intégré d'un bassin versant.
Integrated development of a drainage basin.

À l'échelle du terroir villageois, d'autres quartiers de culture peuvent être aménagés si les paysans qui y cultivent en font la demande et s'organisent en groupe de travail. Ainsi, dans un village comme Ziga, en trois années, trois quartiers de culture ont pu être aménagés, couvrant une superficie totale de 700 ha, soit 18 % du terroir villageois.

LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

Les principales difficultés rencontrées concernent la gestion des déplacements des troupeaux et la régénération des parcours et des ligneux. Le respect de la mise en défens par l'ensemble de la population du village a été partiel dans la majorité des sites malgré l'engagement des groupements et l'appui du projet pour le dédommagement des gardiens. Les actions de régénération de parcours sur des espaces collectifs autres que ceux mis en défens ont été très localisées et conduites sous forme d'expérimentations. Les paysans ont prioritairement aménagé les terres de culture. D'une manière générale, la mobilisation des populations pour des aménagements collectifs a été relativement faible (creusement de « bouli »...), sauf pour la construction de radiers en travers de ravines qui compromettaient la circulation des biens et des personnes en saison des pluies.

L'implantation d'arbustes (espèces rustiques et peu appréciées comme *Acacia nilotica*) le long des cordons pierreux donne des résultats mitigés : la reprise est satisfaisante mais le développement des arbustes est compromis par le passage des animaux en saison sèche (sauf en cas de mise en défens efficace). Les semis de *Andropogon gayanus* dans les mêmes situations sont plus prometteurs. Il semble plus difficile de développer une production significative de bois de chauffe et surtout de bois d'œuvre, principalement du fait de la divagation des animaux en saison sèche et de la faible profondeur des sols (généralement moins d'un mètre).

LES LIMITES D'UNE INTERVENTION PAR PROJET

Le prix de revient de l'aménagement d'un hectare cultivé est compris entre 20 000 et 30 000 F CFA (6 000 à 8 000 F CFA si l'on prend en compte toute la zone mise en défens) (RODRIGUEZ, 1990). Ce prix comprend la location du camion, le petit matériel, les salaires des techniciens du projet. Ce coût ne peut pas être pris en charge par les paysans, l'appui d'un projet ou d'un service public est donc indispensable, avec tous les aléas que cela suppose (durée, ruptures de financement...). Il ne faut donc pas rejeter *a priori* la démarche axée sur la formation des paysans, qui vise à intégrer les techniques d'aménagement dans les pratiques agricoles courantes des paysans. Cette démarche plus lente, moins coûteuse, peut intéresser un plus grand nombre d'exploitations agricoles (DUGUÉ, 1990). Sur cette base, les exploitants agricoles organisés en groupes d'aménagement pourraient être formés pour

gérer différentes opérations indispensables à un aménagement et prises en charge habituellement par un projet : le tracé des courbes de niveau, la production d'arbres en pépinière, la gestion du matériel... Mais le point essentiel reste l'organisation des paysans à différents niveaux de responsabilité et d'intervention (exploitations agricoles, hameaux, villages et petites régions), afin qu'ils puissent réaliser dans les meilleures conditions possible ces aménagements et les valoriser sur une longue période.

CONCLUSION

Les objectifs initiaux et les orientations du projet

Le projet de recherche-développement du Yatenga avait pour objectif de mettre au point des techniques d'amélioration de la production agricole en vue de l'autosuffisance céréalière des populations rurales. Les premières expérimentations et le diagnostic des problèmes des paysans ont montré que la valorisation de l'eau pluviale, et donc la lutte contre l'érosion et le ruissellement, ainsi que le maintien de la fertilité des sols devaient constituer les axes principaux de notre intervention.

Les éléments de base pour la conception des aménagements

Les éléments de base essentiels à prendre en compte pour la conception et la réalisation d'un aménagement de terroir villageois au Yatenga peuvent être regroupés en trois points :

— l'enchaînement des différents milieux agropédologiques implique de concevoir un aménagement global à l'échelle de la toposéquence ou du terroir villageois en prenant en compte la diversité des situations (fort ruissellement en haut de pente, excès d'eau en zone basse) (fig. 7) ;

— du fait des fortes carences des sols, toutes les interventions visant à valoriser l'eau pluviale (lutte contre le ruissellement, rapidité des semis, contrôle de l'enherbement) seront vraiment performantes si elles s'accompagnent de mesures pouvant accroître l'alimentation minérale des cultures (fertilisation, agroforesterie...) ;

— la faiblesse des moyens matériels et financiers des exploitations agricoles et l'importance des prêts de terre constituent les principales contraintes socio-économiques à la mise en œuvre à grande échelle des techniques d'aménagement.

Les acquis et les difficultés rencontrées

Du point de vue des méthodes d'intervention en milieu rural, deux pistes ont été explorées : l'aménagement par des groupes de paysans de quartiers de culture et l'amélioration du parcellaire de l'exploitation agricole. Au regard des résultats obtenus dans les deux cas, il apparaît qu'un appui matériel minimal des populations est néces-

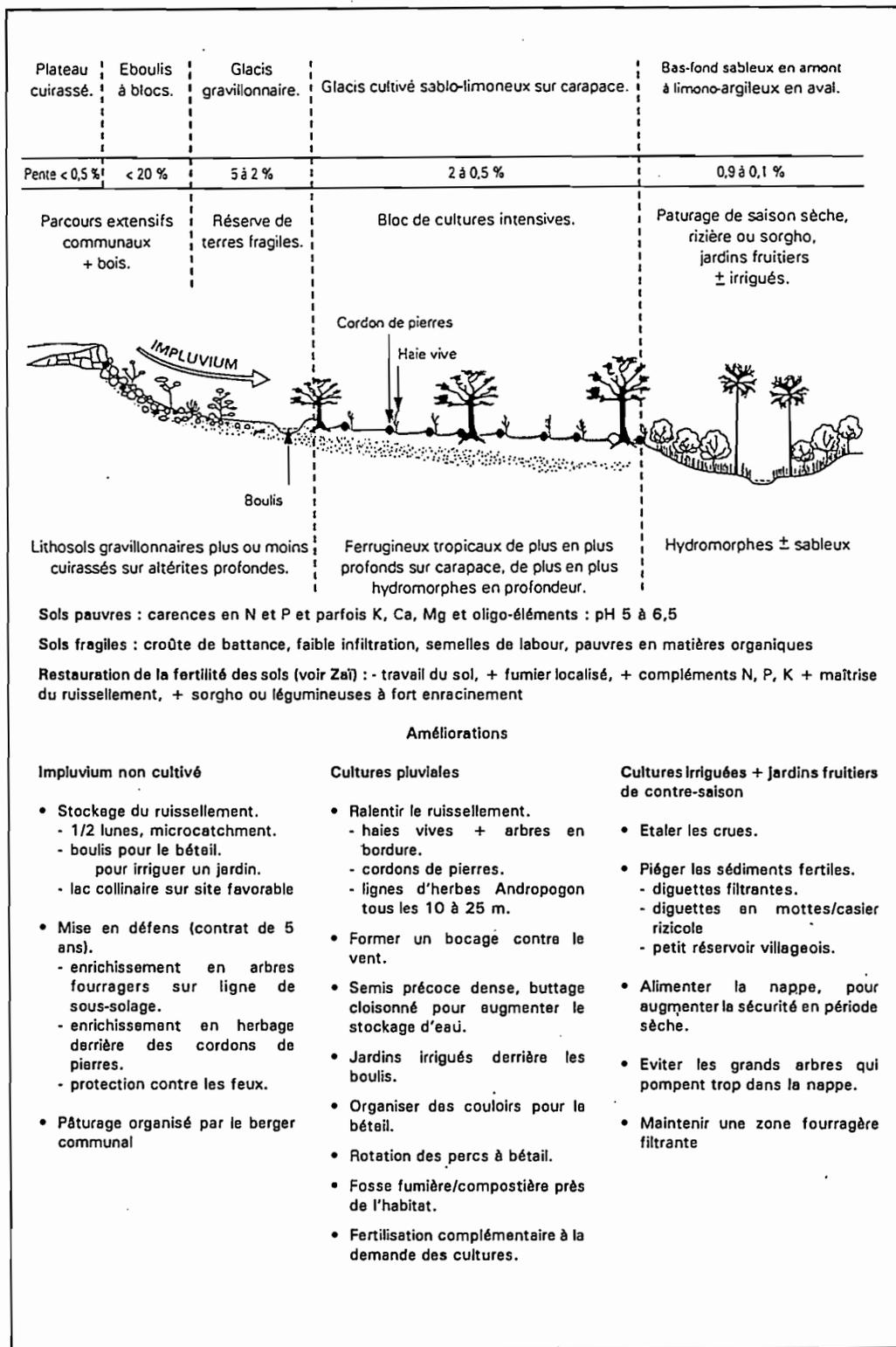


FIG. 7. — Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du plateau mossi : agriculture sous impluvium. D'après ROOSE, 1994.
 Management scheme of a granitic soil on Mossi plateau : crops under rainfed farming. After ROOSE, 1994.

saire pour aboutir à l'aménagement de leur terroir. Par ailleurs, une meilleure formation des paysans et paysannes permettrait une prise en charge de certaines actions gérées habituellement par les projets et une gestion concertée des ressources naturelles disponibles sur leur terroir.

Du point de vue des techniques de GCES, le référentiel mis au point répond en partie aux problèmes diagnostiqués. Un accent particulier a été mis sur l'aménagement des glacis cultivés et l'amélioration des opérations culturales de la principale culture, le mil (maîtrise de l'enherbement, fertilisation raisonnée...). Cela correspond à l'objectif prioritaire des paysans : l'augmentation de leur production céréalière. Sur le plan technique, les aménagements réalisés sont encourageants. Ils ont permis de renforcer les régénérations de ligneux et d'herbacées pérennes, et d'accroître la surface cultivée. L'augmentation de la production céréalière est probable mais difficile à évaluer dans le cadre de ce suivi d'aménagements. Les résultats concernant les plantations d'arbres et d'arbustes, en vue de la production de bois et de fourrage, sont moins satisfaisants du fait principalement des difficultés à organiser les mises en défens et le gardiennage des troupeaux en toute saison.

La démarche entreprise appréhende de façon globale la valorisation des ressources naturelles à l'échelle du terroir villageois. Toutefois, le travail de planification et de réalisation des aménagements n'a pu être mené sur l'ensemble d'un terroir villageois. Les efforts du projet se sont concentrés sur des espaces plus petits où la collaboration avec un petit groupe de paysans (voire avec des paysans individuellement) était efficace et fructueuse.

Les recherches à poursuivre

Si l'on s'en tient aux aspects techniques de la GCES, il est nécessaire de poursuivre les recherches sur :

- le problème de la régénération de la strate arborée (efficacité du « zaï » forestier, choix des espèces par rapport aux types de sol, méthodes de protection...);
- les techniques culturales visant à améliorer l'infiltration des pluies en relation avec le mode de traction animale le mieux adapté (traction asine et bovine);
- les techniques les plus performantes de recyclage des résidus de récolte et d'utilisation de la fumure organique (enfouissement, localisation...);
- les alternatives aux dispositifs antiérosifs basés sur les cordons pierreux;
- le développement de petites zones de culture très intensive avec une irrigation de complément et de saison sèche.

Les enseignements et les perspectives

La combinaison de techniques culturales et d'aménagement performantes et de pratiques d'entretien de la fertilité du sol en association avec l'élevage permet de définir un schéma d'aménagement « idéal ». La comparaison entre ce schéma et notre pratique de terrain fait apparaître la complexité et l'ampleur du travail nécessaire pour aboutir à un aménagement global d'un terroir villageois. De ce constat on peut tirer les enseignements suivants.

Un processus d'aménagement de terroir villageois doit se raisonner au moins sur une dizaine d'années; en conséquence, l'appui des structures de développement doit correspondre au moins à ce laps de temps.

L'efficacité des aménagements implique que les populations élaborent à l'échelle du terroir ou de la petite région les règles de gestion des ressources naturelles et des dispositifs mis en place : conduite des troupeaux en saison des pluies et surtout en saison sèche, gestion des parcours et des mises en défens, entretien des dispositifs antiérosifs...

Du fait des aléas pluviométriques, une intensification totale des systèmes de production (agriculture, élevage) n'est pas envisageable. Elle serait trop coûteuse et trop risquée pour les exploitations agricoles. En revanche, l'aménagement antiérosif et la régénération de la strate arborée et herbacée sur de grandes surfaces (30 à 50 % d'un terroir villageois) permettraient d'accroître significativement la production animale et végétale.

La valorisation d'une petite partie de la surface aménagée (20 à 30 % par exemple) par une intensification raisonnée des systèmes de culture (fumure organique et minérale, surplus de travail, petite irrigation dans certains sites...) est envisageable lorsque les conditions pédologiques sont favorables.

Le manque de dispositifs d'observation pérennes n'a pas permis de tirer de cette expérience tous les enseignements scientifiques (évolution des états de surface et de la fertilité...). Par ailleurs, il sera nécessaire de quantifier les surplus de production obtenus par les aménagements et les techniques qui y sont associées, si l'on veut étudier l'évolution possible de ces terroirs dans les années futures.

La démarche pragmatique adoptée par le projet de recherche-développement a permis la mise au point d'un référentiel technique et de méthodes d'intervention en milieu rural qui pourront être valorisés par des structures de développement et des organisations paysannes des régions soudano-sahéliennes comparables au Yatenga. La gestion conservatoire de l'eau et des sols constitue actuellement le point focal de la dynamisation du développement rural de ces régions.

BIBLIOGRAPHIE

- DUGUÉ (P.), 1985 — « L'utilisation des résidus de récolte dans un système agro-pastoral sahélo-soudanien au Yatenga ». In : *Relations agriculture-élevage*, Montpellier, Cirad-DSA, coll. Documents systèmes agraires, 4.
- DUGUÉ (P.), 1986 — « Utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village : perspectives de développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche au Yatenga. Contraintes techniques et socio-économiques ». In : *Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production*, Montpellier, Cirad-DSA, coll. Documents systèmes agraires, 6.
- DUGUÉ (P.), 1989 a — *Possibilités et limites de l'intensification des systèmes de cultures vivrières en zone soudano-sahélienne. Le cas du Yatenga (Burkina Faso)*. Thèse doct.-ing., Ensa, Montpellier, 261 p.
- DUGUÉ (P.), 1989 b — La culture attelée en zone sahélo-soudanienne : solution viable pour le développement agricole ou utopie d'agronome ? *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 21.
- DUGUÉ (P.), 1990 — Les stratégies des paysans du Yatenga (Burkina Faso) face aux propositions d'aménagement des terroirs villageois. Dossier Gestion des terroirs n° 2. *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 26 : 1-15.
- FORNAGE (N.), 1993 — *Enjeux et possibilités de l'intensification agricole au Nord-Yatenga. Dossier de synthèse*. Ouahigouya, CRPA du Nord/projet PNVY, 78 p.
- LAMACHÈRE (J.-M.), SERPANTIÉ (G.), 1990 — « 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 : *Journées scientifiques Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*, Ouagadougou, Burkina, Aupelf-Uref, 12-15 mars 1990.
- LAMACHÈRE (J.-M.) *et al.*, 1993 — « Fonctionnement et aménagement d'un petit bas-fond soudano-sahélien (Bidi, Yatenga, Burkina Faso) ». In : *Bas-fonds et riziculture*. Actes du séminaire Cirad-Fofifa, Antananarivo, Madagascar (9-14 décembre 1991), Montpellier, Cirad : 469-486.
- LE THIEC (G.), 1990 — Le coutrier en traction animale : recherche d'alternative au labour en zones sèches. *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 28 : 83-86.
- MARCHAL (J.-Y.), 1983 — *Yatenga. Nord-Haute-Volta. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 167, 849 p.
- NICOU (R.), OUATTARA (B.), SOME (L.), 1987 — *Effets des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières au Burkina Faso*. Ouagadougou, Inera-Cirad, 77 p.
- PIERI (C.), 1989 — *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, Cirad, 444 p.
- RODRIGUEZ (L.), 1990 — « Les aménagements intégrés de quartiers de culture du terroir de Ziga (Burkina Faso) ». Communication à l'Atelier sur les techniques de collecte et de gestion des eaux de ruissellement en Afrique subsaharienne, Ouagadougou, Burkina, 45 p.
- RODRIGUEZ (L.), DUGUÉ (P.) *et al.*, 1990 — *30 fiches techniques de vulgarisation*. Projet de recherche-développement du Yatenga, CRPA, Inera, Cirad-DSA.
- ROOSE (E.), 1992 — « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols ». In Le Floc'h (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.), Bille (J.-C.), éd. : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la GCES. *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.), 1990 — *Aménagement de terroirs au Yatenga. Quatre années de GCES : bilan et perspectives*. Montpellier, Orstom, 40 p.
- SERPANTIÉ (G.), LAMACHÈRE (J.-M.), 1989 — « Aménagement des pentes cultivées soudano-sahéliennes grâce à des réseaux de microbarrages isohypses et filtrants. Nécessité d'une amélioration de leurs conditions de mise en œuvre ». In : 6th International Soil Conservation Conference (ISCO), Addis-Abeba, Éthiopie, 6-18 novembre 1989.
- WRIGHT (P.), 1985 — *Gestion des eaux de ruissellement*. Oxfam/Projet agro-forestier du Yatenga.

Les techniques de mesure
Measurement practices

Photo G. De Noni



Ce stimulateur de ruissellement, très simple à réaliser et à transporter, permet d'injecter une lame d'eau sur le sol et d'apprécier le comportement de ce dernier sous l'effet de l'énergie du ruissellement, sur une longueur de versant d'une dizaine de mètres.

Note sur la conception et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement

Jean ASSELINE, Georges DE NONI, Jean-François NOUVELOT et Éric ROOSE

Centre Orstom, BP 5045,
34032 Montpellier cedex 1, France.

RÉSUMÉ

Sous l'action des précipitations, un sol évolue et s'érode parce qu'il est soumis à l'énergie libérée par les gouttes de pluie qui s'écrasent au sol d'une part, et au ruissellement qui se concentre durant son déplacement sur le versant d'autre part. La simulation de pluie, parce qu'elle est généralement pratiquée sur une petite parcelle d'un mètre carré, ne permet d'apprécier que l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Pour compléter cette approche, il était utile de concevoir un autre test qui permette de simuler le ruissellement sous diverses conditions morphopédologiques et d'occupation du sol. À l'occasion d'un programme de recherche dans le Sud-Aveyron, un simulateur de ruissellement, facile d'emploi et de coût peu élevé a été conçu et utilisé. Bien que cet appareil, au même titre que le mini-simulateur de pluie, ne reproduise que partiellement les phénomènes naturels, il constitue néanmoins, à l'analyse des premiers résultats obtenus, un excellent test comparatif sur différentes couvertures pédologiques et végétales. Il a permis aussi de mieux comprendre l'action du ruissellement et notamment, dans le cas étudié, le rôle essentiel de l'écoulement subsuperficiel ou hypodermique.

MOTS CLÉS : Simulateur de ruissellement — Ruissellement subsuperficiel — Techniques culturales.

ABSTRACT

ABOUT THE DESIGN AND THE USE OF A RUNOFF SIMULATOR

Under the influence of rainfall, soil surface properties are evolving: the soil becomes eroded because it is subjected to rain drop energies falling on the topsoil, and runoff energies increasing along the slope. Rainfall simulation which is generally made on 1 m² plots allows to evaluate only the impact of raindrops on the ground surface. In order to improve this approach, it was useful to design another device which will allow to simulate runoff in various morphopedological land use conditions. In the case of a research programme conducted in Aveyron (southern France), an easy to use and cheap runoff simulator was designed and used. Although this device reproduces only partially the natural runoff phenomena, it is, nevertheless, given the first results obtained, a very good comparative test in different soil and plant covers. It also allowed a better understanding of the action of runoff and especially, in the case studied, the main role of sub-surface runoff.

KEYWORDS : Runoff simulator — Sub-surface runoff — Cultural practices.

RESUMEN

APROPÓSITO DEL DISEÑO Y DEL USO DE UN SIMULADOR DE ESCURRIMIENTO

Bajo la acción de las precipitaciones, un suelo se transforma y se erosiona porque está sometido a las energías liberadas por una parte por las gotas de lluvia que se estrellan contra el suelo y por otra parte por el escurrimiento que se concentra a lo largo de la vertiente. La simulación de lluvias, porque se realiza generalmente sobre una pequeña parcela de 1 m², toma en cuenta sólo el papel de las gotas de lluvias sobre el suelo. Para completar las observaciones, fue necesario concebir un otro tipo de experimentación para simular el papel del escurrimiento bajo diversas condiciones morfo-edafológicas y de uso del suelo. Tomando la oportunidad de una investigación en el Sur Aveyron, un simulador de escurrimiento, de uso cómodo y de costo barato, ha sido concebido y utilizado. A pesar de que este aparato, al igual que el simulador de lluvias, simule de manera parcial los fenómenos naturales, permite sin embargo, a la luz de los primeros resultados, realizar excelentes observaciones bajo diversas condiciones edafológicas y de uso del suelo. También ha permitido comprender mejor la dinámica del escurrimiento y en particular, en el caso estudiado, el papel del escurrimiento sub-superficial.

PALABRAS CLAVES : Escurrimiento simulador — Sub-superficial escurrimiento — Culturales practicas.

INTRODUCTION

La simulation de pluie sur une petite parcelle d'un mètre carré permet d'apprécier le comportement du sol soumis à l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Celles-ci provoquent le détachement des particules du sol, la restructuration de son état de surface et la naissance d'un ruissellement en nappe, éventuellement d'une érosion en nappe, seule manifestation de ce processus si l'on considère la faible longueur de pente concernée. Il est ainsi possible de mesurer ponctuellement l'intensité de ruissellement, d'en déduire l'intensité d'infiltration et d'évaluer les pertes en terre succédant à l'effet de battance (« détachabilité » ou « *interrill erosion* »).

Dans ces conditions de protocole expérimental, les processus érosifs induits par l'énergie du ruissellement concentré, tels qu'ils apparaissent généralement sur un versant, ne peuvent être appréhendés. Dans ce type de dynamique interviennent en effet, outre la pluie en tant que facteur climatique, des facteurs biologiques tels que l'occupation du sol, des facteurs physiques du milieu parmi lesquels la longueur et l'inclinaison de la pente du terrain. Le rôle de ces derniers a relativement peu été étudié et les quelques références disponibles montrent la complexité des relations pouvant exister entre ruissellement, érosion et morphologie du versant. Pour certains chercheurs, l'augmentation de l'inclinaison ou de la longueur de pente induit une diminution du ruissellement (ROOSE, 1973, 1994 ; VALENTIN, 1978, 1981 ; LAL, 1982) mais pas des charges solides ; d'autres, en revanche, constatent une grande variabilité dans ces relations (LENVAIN, 1975 ; MEYER *et al.*, 1976 ; POESEN et BRYAN, 1989-1990).

Pour compléter ces différentes approches, il est apparu utile de concevoir un appareil et de mettre en place une expérimentation qui permettent de simuler le ruissellement

sous diverses situations morphopédologiques et d'occupation des sols. Dans cet esprit, différents chercheurs ont été amenés à proposer un simulateur de ruissellement, ou « ruissellateur », utilisé sur une parcelle d'un mètre carré (JANEAU, 1983 ; PLANCHON, 1985). Néanmoins, pour être plus proche des conditions naturelles d'un versant et apprécier l'érosion linéaire sur une parcelle de plusieurs mètres de longueur, il s'est avéré nécessaire de concevoir un nouvel appareil. Son fonctionnement a été testé à l'occasion d'un programme de recherche mené dans le Sud-Aveyron.

OBJECTIFS DE L'APPAREILLAGE

Les caractéristiques du simulateur de ruissellement doivent permettre de répondre au double objectif suivant :

— le premier, d'ordre scientifique, est de fournir, à la sortie de l'appareil et sans apport pluvial, un débit contrôlé et réglable, distribué sur le sol sous forme d'une lame d'eau uniforme sans énergie cinétique initiale, et de mesurer, à une distance choisie, l'écoulement, superficiel et (ou) subsuperficiel (ou hypodermique), ainsi que les éléments entraînés en suspension et (ou) en solution ;

— le second, d'ordre technique et économique, est de concevoir un appareil de coût modeste (moins de 5 000 FF), maniable, simple d'emploi et ne nécessitant pas un approvisionnement en eau trop important (2 à 5 m³).

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'APPAREIL

Le dispositif adopté se compose de trois parties essentielles (fig. 1).

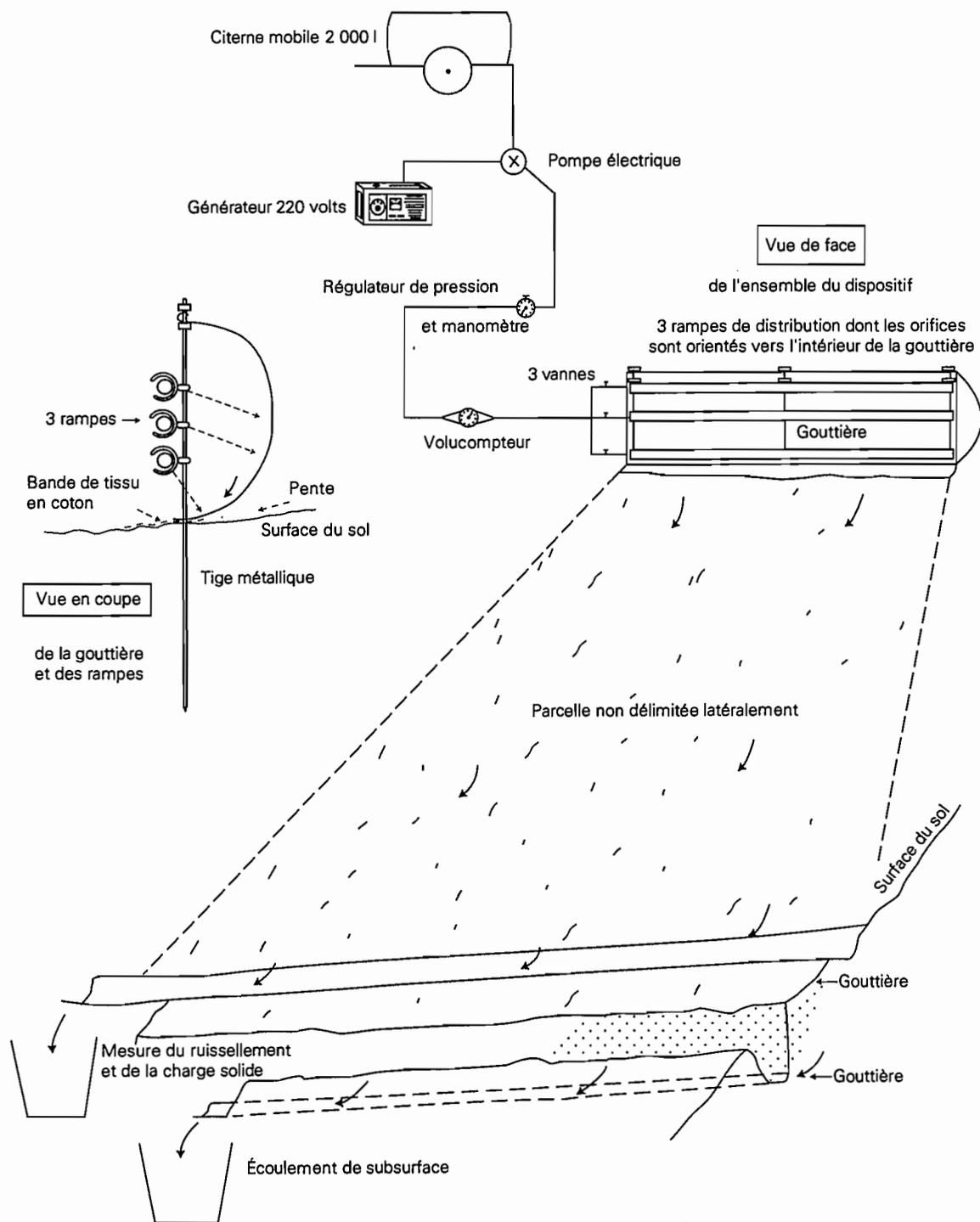


FIG. 1. — Schéma du ruissellomètre.
Diagram of the runoff simulator.

Un dispositif pour produire une nappe ruisselante de faible énergie

Le corps principal de l'appareil est constitué de trois rampes d'injection en tubes PVC rigides de 2 m de longueur et de 25 mm de diamètre. Chaque tube présente une ligne de perforations, d'un diamètre de 1 ou 1,5 mm, distantes de 2 cm, soit 98 perforations par tube.

Ces trois tubes superposés sont réunis à l'aide de clips en PVC coulissant sur trois tiges métalliques de 30 cm de longueur et de 6 mm de diamètre ; ce montage permet de régler l'écartement des tubes ainsi que l'orientation des jets. Ils sont placés dans une gouttière en PVC de 2 m de longueur, fermée aux deux extrémités. L'ensemble est maintenu sur le sol en position verticale grâce aux trois tiges métalliques enfoncées en terre sur une quinzaine de centimètres. La gouttière est orientée avec l'ouverture face à l'aval, les perforations des tubes étant dirigées au contraire vers l'amont, de telle sorte que les filets d'eau viennent s'écraser sur le fond de la gouttière. L'énergie cinétique de l'eau est ainsi fortement diminuée et sa sortie du dispositif, s'effectuant uniquement par gravité, provoque un ruissellement en nappe. Une distribution uniforme de la lame d'eau au contact du sol est obtenue à l'aide d'une « jupe » de tissu, bande de coton collée à l'extérieur tout le long de la gouttière et reposant sur le sol sur une dizaine de centimètres de largeur ; elle joue le rôle d'une mèche d'écoulement.

Une alimentation en eau

Celle-ci s'effectue à partir d'une citerne d'une capacité suffisante, correspondant à la durée prévue de l'expérimentation ; avec une rampe de deux mètres de largeur, on peut obtenir un débit maximal de deux mètres cubes durant une heure.

L'eau est mise en pression par une électropompe, elle-même alimentée par un groupe électrogène. Cette pression est contrôlée à l'aide d'une vanne, d'un régulateur de pression et d'un manomètre de façon à réguler le débit en fonction de l'objectif défini. Il est possible d'intervenir également sur le nombre de rampes en fonctionnement.

Un second ensemble de distribution, présentant les mêmes caractéristiques (vanne, gouttière, rampe), peut être ajouté en prolongation du premier, sur la même courbe de niveau, afin d'obtenir un dispositif de quatre mètres de largeur, l'approvisionnement en eau devant dans ce cas être doublé.

Un dispositif de mesure

Une gouttière disposée sur le sol et éventuellement une autre gouttière positionnée à une profondeur déterminée permettent de réceptionner le ruissellement superficiel et l'écoulement de subsurface, ainsi que les charges solides et les solutés. Dans tous les cas, pour que l'on soit certain d'appréhender toute la largeur du front de ruissellement,

la longueur des gouttières (ou du canal de recueil des eaux) doit être supérieure à celle du ruissellateur. La longueur de pente peut varier du mètre à quelques dizaines de mètres, en fonction du plan d'expérimentation. En présence d'une pente naturelle régulière où les risques de ruissellement provenant d'une autre section de pente sont faibles (*run on*), il n'est pas nécessaire de placer des bordures pour délimiter la parcelle. Cela étant, la surface ainsi définie est suffisamment étendue pour permettre la hiérarchisation de l'écoulement.

MATÉRIEL UTILISÉ

Les principaux matériels utilisés sont :

- une électropompe de capacité de 6 m³/h, sous 1,5 bar ;
- un groupe électrogène de 800 W ;
- 20 m de tuyau souple de 32 mm de diamètre ;
- 2 m de tuyau souple de 20 mm de diamètre ;
- un compteur volumétrique d'eau, de capacité de 7 m³/h ;
- un régulateur de pression de 0 à 6 bars ;
- des raccords, coudes, embouts en PVC ;
- trois vannes sphériques 1/4 de tour, l'une de 1 pouce et les deux autres de 3/4 de pouce ;
- trois tubes PVC rigides de 2 m de longueur, un de 32 mm de diamètre, deux de 25 mm, avec bouchon collé à une extrémité et raccord avec coude à 90° à l'autre extrémité ;
- une gouttière PVC de 15 cm de diamètre et 2 m de longueur, avec un fond droit et un fond gauche ;
- neuf clips PVC pour le support des rampes ;
- trois tiges métalliques de 30 cm et six écrous de 6 mm de diamètre.

Pour la collecte et la mesure du ruissellement, il faut ajouter : canaux en fibrociment, ou gouttières PVC ; seaux plastiques gradués de 10 litres ; éprouvettes de 2 litres ; récipients gradués ; chronomètre ; décimètre ; chaux ou autres colorants marqueurs du ruissellement.

EXEMPLE D'APPLICATION

L'appareil a été testé sur le terrain à l'occasion d'une étude (ASSELINE *et al.*, 1994) menée dans le Sud-Aveyron, dont l'objectif était de mesurer les risques d'érosion, en nappe et linéaire, sur des sols cultivés.

Dans un premier temps, des mesures ont été effectuées sous pluies simulées (mini-simulateur de pluie sur un mètre carré) pour évaluer la fonction de production de ruissellement et de sédiments ; l'utilisation séparée du ruissellateur a ensuite permis, sans apport pluvial, d'étudier la fonction de transfert (ruissellement et charges solides).

Pour un même type de sol, les situations culturales suivantes ont été retenues et testées :

- semis direct : sol tassé par le pâturage, après culture céréalière et repousse herbacée grillée aux herbicides ;
- labour perpendiculaire à la pente, suivi d'un hersage (herse rotative avec semoir), laissant un sol motteux ;
- labour dans le sens de la pente, suivi d'un hersage et d'un passage du cultipacker, qui a éclaté les mottes et tassé la surface.

Les états de surface ont été décrits le long de transects ; ils ont été définis par le pourcentage :

- de surfaces ouvertes (mottes, fissures) ;
- de surfaces fermées (pellicules de battance, croûtes de sédimentation, cailloux) ;
- de surfaces couvertes (litières, végétation, cailloux) ;
- de rugosité (entre chaque simulation, l'évolution des microformes est estimée grâce à l'emploi d'une chaînette souple).

Pour chaque situation culturale, la simulation expérimentale est répétée sur trois états d'humidité différents :

- un premier ruissellement sur sol humide dont l'état d'humectation a été préservé des pluies naturelles et de

l'évaporation par une bâche plastique placée sur le terrain un mois environ avant le début des essais ;

- une deuxième simulation intervient une heure après le premier essai et donc sur un sol très humide tel qu'il peut se présenter en fin d'automne ou de printemps ;

- une troisième simulation est réalisée huit jours après la deuxième sur un sol plus sec, présentant des conditions proches de celles rencontrées en période estivale, lors des orages d'été.

La topographie naturelle du versant a permis de sélectionner, sans avoir recours à des limites artificielles, des parcelles de dix mètres de longueur (20 % de pente) au pied desquelles a été inséré un canal en fibrociment en vue de récupérer l'eau de ruissellement superficiel et les charges solides. Légèrement en aval du canal, un fossé a été creusé jusqu'à la roche mère (schiste à faible profondeur, 30 à 40 cm de la surface) dont le pendage est en concordance avec la pente topographique. Ce dispositif a permis d'observer un ruissellement de subsurface, interne au sol, et d'en évaluer l'importance.

À titre d'exemple, les résultats obtenus durant la première simulation sont récapitulés dans le tableau I.

TABLEAU I
Première simulation de ruissellement
First runoff simulation

Ruissellement de surface

	Pente (%)	Kr (%)	C (g/l)	Vm (m/s)	Krmax (%)
SD	21,5	47,3	0,09	0,05	74,1
L + 1H + Cpk	20,0	31,9	3,87	0,18	47,7
L + 1H	20,0	0		0	0

Écoulement interne (de subsurface)

L + 1H	20,0	8,8		0,002	49,9
--------	------	-----	--	-------	------

Kr : coefficient de ruissellement global ; C : concentration moyenne ; Vm : vitesse moyenne de ruissellement ; Krmax : coefficient de ruissellement maximal.

Seules ruissent la parcelle traitée en semis direct (SD) et la parcelle labourée avec hersage et un passage du cultipacker (L + H + Cpk). Dans les deux cas, le régime permanent (fig. 2) est atteint au bout de cinquante minutes environ, avec un coefficient de ruissellement instantané maximal atteignant respectivement 74 % et 48 %. La vitesse de ruissellement est près de quatre fois supérieure sur la parcelle traitée au cultipacker (18 cm/s) que sur celle en semis direct (5 cm/s). Sur la parcelle compactée au cultipacker, on constate, en effet, que si le ruissellement commence en nappe, avec un seul front d'humectation sur les dix à vingt premiers centimètres de la parcelle, très

rapidement, au-delà d'un mètre environ de la rampe d'injection, les filets d'eau s'organisent en écoulements linéaires suivant les traces de roues des tracteurs ou les sillons provoqués par les outils de travail, sans respecter strictement la pente naturelle du terrain. Ces traces de chenaux à fond tassé fonctionnent comme une série de « microcascades » qui traduisent une rugosité d'environ 30 % du fond du chenal.

La différence de vitesse de ruissellement explique, par ailleurs, que les quantités de charges solides soient presque nulles pour le semis direct (0,1 g/l), où la couverture végétale ralentit sensiblement le ruissellement, et que ces

charges varient de 1 à 15 g/l pour la parcelle nue compactée. Néanmoins, le tracé du turbidigramme (fig. 2) montre une forte décroissance de la concentration des matières en suspension en fonction du temps ; cela est dû en particulier à l'absence de détachement des particules de sol par une pluie.

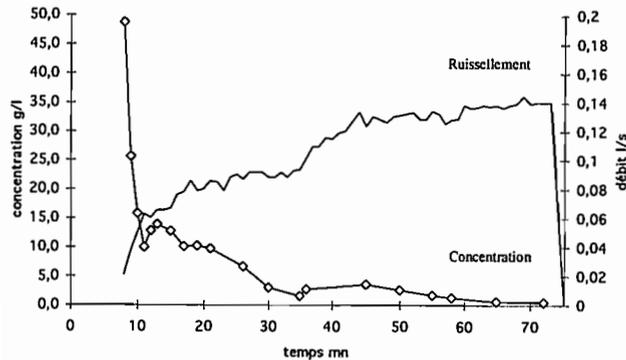


FIG. 2. — Première simulation de ruissellement sur « labour + hersage + cultipacker ».

First runoff simulation on « ploughing + harrowing + cultipacker ».

Dans le cas du labour sans passage de cultipaker (L + 1H b), aucun ruissellement superficiel n'a été observé malgré des débits et des volumes d'eau injectés importants :

- première simulation, un débit de 800 l/h durant 116 min ;
- deuxième simulation, un débit de 2 000 l/h durant 40 min ;
- troisième simulation, un débit de 1 300 l/h durant 89 min.

L'expérimentation a permis d'observer que dans ce cas la circulation de l'eau s'effectuait de manière subsuperficielle, à une profondeur se situant entre 25 et 35 cm dans la couche de sol située juste au-dessus du schiste altéré. Le front d'humectation dans le sol, observé à l'aide de petites fosses ouvertes dans le sol et disposées tous les mètres au long de la pente, avance d'une douzaine de centimètres par minute.

Après la fermeture des vannes d'injection, alors que le ruissellement superficiel était toujours nul, l'écoulement de subsurface, en bas de la parcelle, s'est poursuivi durant de nombreuses minutes (86 minutes dans le cas du troisième essai), et on a mesuré des quantités d'eau correspondant à des coefficients d'écoulement moyens dépassant 30 % et à des coefficients instantanés maximaux de 50 à 65 %. Ces valeurs représentent nécessairement une limite inférieure par rapport aux coefficients réels, sachant qu'el-

les correspondent à un front de drainage mesuré sur six mètres de longueur, alors que nous avons pu vérifier *a posteriori* que sa longueur totale atteignait environ huit mètres. Une valeur voisine de 40 à 50 % paraît vraisemblable pour le coefficient moyen d'écoulement de subsurface.

CONCLUSION

Ces premiers essais de simulation de ruissellement sur un cas de terrain permettent de déduire un certain nombre d'enseignements d'ordre technique et scientifique.

L'appareil utilisé, au même titre que le mini-simulateur de pluie, ne reproduit qu'incomplètement les phénomènes naturels ; il faudrait, dans un deuxième temps, pouvoir simuler des pluies tout au long du versant. En outre, dans sa conception actuelle, il n'est pas facile de rattacher le débit distribué linéairement à une lame ruisselée qui, au cours d'un événement pluviométrique, se répartirait sur l'ensemble de la superficie de la parcelle.

En revanche, il constitue un excellent test comparatif, non sensible au vent et bon marché, pour évaluer l'action de l'énergie du ruissellement sur différentes pratiques culturales et couvertures pédologiques. Par ailleurs, la non-reproduction de tous les phénomènes naturels intervenant n'est pas nécessairement un handicap, car la prise en compte d'un nombre limité de facteurs facilite leur analyse, soit directement (ruissellement superficiel), soit par défaut (décroissance rapide des charges solides due à l'absence du phénomène de « splash »).

Dans l'exemple de l'Aveyron, l'utilisation de cette technique a permis de mettre en évidence plusieurs résultats importants :

- le semis direct s'avère être la pratique culturale la moins érosive ; néanmoins, il ne peut être une solution durable, sans mesure d'accompagnement concernant la maîtrise de l'eau à l'échelle du versant, car il n'induit pas, sur des sols ayant été compactés par le pâturage ou les engins agricoles, une baisse sensible du ruissellement ; si la rugosité du couvert végétal entraîne une diminution de la vitesse du ruissellement, on n'observe pas pour autant une augmentation de l'infiltration ;

- la présence d'un écoulement subsuperficiel a été révélée expérimentalement ; l'importance de ce phénomène corrobore les observations de terrain qui avaient montré l'existence de nombreuses petites zones engorgées d'eau (mouillères) à l'affleurement des bancs de schiste dur. Ce type de flux interne peut être à l'origine du déclenchement de glissements de terrain et de la perte d'éléments fertilisants (naturels ou artificiels) ou de pesticides.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.), DE NONI (G.), NOUVELOT (J.-F.), ROOSE (E.), 1994 — « Soil erodability in mediterranean mountains of Aveyron (in southern part of France) ». In : ISCO 8, 4-5 janvier 1994, Delhi, Inde, 12 p.
- DE NONI (G.), NOUVELOT (J.-F.), ROOSE (E.), 1994 — *Projet de recherche sur l'érosion et la conservation des sols cultivés et sous pâturages en Sud-Aveyron*. Montpellier, Orstom, 6 p.
- GUILLERM (C.), 1994 — *Diagnostic de l'érosion pluviale dans les Rougiers de Camarès, propositions de pratiques culturales*. Paris, Cnam et Ina-PG, 51 p.
- JANEAU (J.-L.), 1983 — Construction d'un ruisselleur ou simulateur de ruissellement. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 20 (4) : 361-365.
- LAL (R.), 1982 — Effects of slope length and terracing on runoff and erosion on a tropical soil. *IAHS*, 137 : 23-31.
- LENVAIN (J.), 1975 — *Kritische studie van de Universele Erosvievergelijking en haar bruikbaarheid als evaluatiemiddel van de bodemkonditionerings techniek in de vochtige tropen*. PhD thesis, RU Gent, 131 p.
- MEYER (L. D.), DECOURSAY (D. G.), ROMKENS (M. J.), 1976 — « Soil erosion concepts and misconcepts ». In : Proc. III^d Intern. Agency Sed. conf. VS Geol. Survey, Denver.
- PLANCHON (O.), 1985 — *Utilisation d'un simulateur de ruissellement pour l'étude expérimentale de l'érosion*. Orstom-Côte d'Ivoire, programme Hyperbav, 16 p.
- POESEN (J. W. A.), BRYAN (R. B.), 1989-1990 — Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 71-80.
- ROOSE (E.), 1973 — *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. Thèse doct.-ing., fac. Sciences, Abidjan, n° 20, 125 p.
- ROOSE (E.), 1994 — Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- VALENTIN (C.), 1978 — *Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire*. Abidjan, Orstom, 152 p.
- VALENTIN (C.), 1981 — *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez, Niger)*. Thèse 3^e cycle, pédologie, univ. Paris-VII, 229 p.

Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples

Éric ROOSE (1), Philippe BLANCANEUX (2) et Pedro Luiz de FREITAS (2)

(1) Centre Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

(2) Orstom et Embrapa/CNPS, Rua Jardim Botânico, 1024, 22 460 000 Rio de Janeiro, (R.J.) Brésil.

RÉSUMÉ

Pour réaliser un bon diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion sur un versant, il convient d'observer le fonctionnement hydrique du terrain au cours de la saison des pluies ou au moins de tester la capacité d'infiltration des sols soumis à diverses utilisations. Dans cette note est décrit un test au cylindre unique, test simple et peu coûteux permettant non seulement de classer les horizons d'un sol en fonction de leur capacité d'infiltration, de leur porosité et de leur réserve en eau utile, mais aussi de visualiser le mode de pénétration de l'eau d'un horizon au suivant. La discussion porte sur l'intérêt et les limites de cette méthode. Deux exemples montrent l'intérêt pratique de ce test de terrain sur des sols ferrallitiques argileux du Brésil et sur un sol ferrugineux tropical sableux du Cameroun.

MOTS CLÉS : Capacité d'infiltration — Porosité — Réserve d'eau utile — Méthode de terrain.

ABSTRACT

A SIMPLE FIELD TEST FOR EVALUATION OF THE INFILTRATION CAPACITY AND THE HYDRODYNAMIC BEHAVIOUR OF SURFACE SOIL HORIZONS: METHOD AND EXAMPLES

To predict runoff and erosion hazard on a hillslope, the best solution is to observe the runoff ways on the ground during rainstorms of the rainy season. In this paper, is described the test of monocylinder: it is a very simple and costless test which allows to classify soil horizons in relation to their infiltration capacity, their porosity and their waterstorage capacity, but also to see how irrigation water drains from one horizon to the next. Interests and limitations of this test are discussed. Two case studies demonstrate the practicability of this test on silty clay oxisols of Brazil and on a sandy alfisol of Cameroon.

KEYWORDS : Field test description — Infiltration capacity — Porosity — Waterstorage capacity.

RESUMEN

UNA SIMPLE PRUEBA DE CAMPO PARA EVALUAR LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN Y EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE LOS HORIZONTES SUPERFICIALES DE LOS SUELOS : MÉTODOS Y EJEMPLOS

Para hacer un buen diagnóstico de los riesgos de arroyada y de erosión en una vertiente, es conveniente observar el funcionamiento hídrico del suelo durante la estación de las lluvias o al menos experimentar la capacidad de infiltración de los suelos sujetos a diversas utilizations. En esa nota, se describe una prueba con un cilindro único, es una prueba simple y poco costosa que permite no sólo clasificar los horizontes de un suelo con arreglo a su

capacidad de infiltración, a su porosidad y a su reserva de agua útil sino que visualizar el modo de penetración del agua desde un horizonte hasta el siguiente. La discusión trata del interés y de los límites de ese método. Dos ejemplos muestran el interés práctico de esa prueba de campo sobre los suelos ferralíticos arcillosos de Brasil y sobre un suelo ferruginoso tropical arenoso de Camerún.

PALABRAS CLAVES : Capacidad de infiltración — Porosidad — Reserva de agua útil — Método de campo.

PROBLÉMATIQUE

Le diagnostic des problèmes d'érosion sur un versant exige une bonne compréhension du comportement hydrodynamique des sols, en particulier la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration des horizons superficiels soumis à différents systèmes de culture et la perméabilité des horizons sous-jacents.

Or la capacité d'infiltration des horizons de surface dépend :

— de l'état de la surface du sol : rugosité, activité biologique et couverture végétale, humidité, fissuration, pierrosité, agrégation et organisations pelliculaires superficielles (CASENAVE et VALENTIN, 1989) ;

— du potentiel de succion du sol : déficit de saturation, profondeur du front d'humectation et organisation des horizons successifs ;

— de la hauteur de la nappe d'eau au-dessus du sol.

Pour évaluer rapidement, sur le terrain, la réaction du sol à une averse (ou à une lame d'eau de ruissellement ou d'irrigation), il n'existe aucune méthode parfaite.

La *simulation de pluies* donne des indications intéressantes si l'origine du ruissellement est à chercher dans la dynamique des états de surface, mais elle a ses limites :

matériels coûteux (50 000 à 80 000 F), consommation d'eau importante (600 litres par heure), un mois de terrain pour trois observateurs pour une toposéquence, pente limitée (jusqu'à 35 %), surface de mesure réduite à un mètre carré (ASSELIN et VALENTIN, 1979). La méthode ne convient pas si le ruissellement provient de l'engorgement d'un horizon profond ou de la concentration des eaux en bas de versant (COSANDEY *et al.*, 1990).

La *méthode conventionnelle des doubles anneaux* (Muntz) peut donner des résultats intéressants pour étudier l'infiltration des eaux d'irrigation par submersion dans les sols alluviaux (BOIVIN et TOUMA, 1988). Cependant, elle exige beaucoup d'eau et de temps, ne convient pas pour des pentes supérieures à 5 % et ne donne pas le même classement des sols que le simulateur de pluies : les conditions d'infiltration sont trop éloignées des conditions des pluies naturelles (LAFFORGUE et NAAH, 1976).

On peut observer dans le tableau I que les coefficients de ruissellement sur parcelles d'érosion sont loin d'être nuls sous culture. L'intensité maximale des pluies décennales pendant trente minutes étant inférieure à 100 mm/h (BRUNET-MORET, 1967 ; ROOSE, 1973), on ne devrait constater aucun ruissellement quel que soit l'état de la surface du sol.

TABLEAU I

Comparaison des coefficients de ruissellement annuels à la parcelle de 90 m² et de la capacité d'infiltration finale au double anneau d'un sol ferrallitique très désaturé sablo-argileux de la station Orstom d'Adiopodoumé (ROOSE, 1973)
Comparison between the annual runoff coefficients in the 90 m² plot and the Muntz's double ring final infiltration capacity method of a clay sand highly unsaturated ferralitic soil in the Orstom station of Adiopodoumé (Roose, 1973)

	Infiltration finale (Muntz) (mm/h)	Coefficient de ruissellement annuel (%)
Forêt secondaire sempervirente	1200	2
Terre de culture	600	25
Sol dégradé dénudé depuis 5 ans	400	33

La *méthode Porchet* évalue la perméabilité à partir de la mesure de la descente du niveau d'eau dans un trou de sondage : elle intéresse les hydrogéologues mais renseigne peu sur l'influence des états de surface du sol (AUDRY *et al.*, 1973).

La méthode de *mesure de la tache d'humidité* laissée par un goutteur de débit connu sur un sol peut rendre de grands services pour évaluer avec précision la capacité

d'infiltration d'une surface encroûtée bien plane (BOIFFIN, 1984). Elle ne peut s'appliquer sur des surfaces rugueuses ou pentues.

Le *test en cylindre unique* proposé ici est simple : il n'exige que peu de matériel, peu d'eau et peu de temps. Il est très sensible à l'état de surface du sol et permet de plus, si le sol est sec, d'examiner la perméabilité relative des horizons sous-jacents en place, la forme de la tache

d'humectation et les risques de drainage oblique. En outre, sur le même site, on peut mesurer la densité apparente de chaque horizon, son humidité maximale (= porosité fonctionnelle), sa réserve hydrique à capacité au champ (24 heures après = microporosité) et éventuellement sa densité réelle (à partir de laquelle on calcule la porosité totale) et son humidité minimale sous culture (point de flétrissement réel de la végétation herbacée ou pF 4,2). On peut en déduire la réserve utile pour les cultures.

Ce n'est qu'un test comparatif qui permet de classer les sols, les horizons et les états de surface en fonction de leur capacité d'infiltration et de stockage des eaux.

MATÉRIEL

Il est réduit à :

- cinq cylindres de 10 cm de diamètre et 8 à 10 cm de hauteur, à bord biseauté vers le bas (une boîte à conserve d'un litre évidée peut convenir) ;
- cinq réglettes de 100 mm fixées à 1 cm de la base intérieure des cylindres ;
- des papiers-filtres rapides pour protéger l'état de surface du sol ;
- un chronomètre ordinaire, un mètre pliant et une cuillère à soupe ;
- un litre d'eau propre par test, une pissette de 500 cm³, un petit flotteur (brindille) ;
- une bêche ou une machette pour découper le profil humecté ;
- un carnet pour noter la forme des taches et les diverses observations de terrain.

MÉTHODE

1. Choisir une zone représentative d'un état de surface du sol, si possible en période sèche, sans pluie depuis plus de dix jours.
2. Enfoncer délicatement et bien verticalement le cylindre en perturbant le moins possible la surface du sol. Un léger coup de pissette mouillant l'intérieur des parois du cylindre peut aider à faire pénétrer le cylindre de 1 ou 2 cm dans le sol.
3. Assurer l'étanchéité en tassant le sol autour du cylindre et en y posant un cordon d'argile.
4. Poser un papier-filtre couvrant tout le fond du cylindre pour éviter de créer une suspension en versant l'eau, laquelle suspension pourrait former une croûte artificielle au cours de l'infiltration.
5. Poser au niveau du sol une réglette de lecture du niveau d'eau (au millimètre près).
6. Verser rapidement de l'eau claire (sur une cuillère à soupe tordue pour casser l'énergie de chute) jusqu'à atteindre 5 cm à la réglette. Lire au chronomètre le T₀. Poser

une brindille sur la réglette pour observer sans erreur de parallaxe le niveau d'eau descendant dans le cylindre.

7. Noter le temps de passage du niveau d'eau à chaque centimètre de la réglette.

8. Remettre 5 cm d'eau sur la surface mouillée du sol et poursuivre le chronométrage.

9. Quand l'eau disparaît de la surface du sol (différence de brillance), enlever rapidement le cylindre et le filtre.

10 a. Prélever le plus tôt possible, à l'aide de la cuillère, un échantillon de sol détrempe (Hp max. x da = porosité efficace pour la circulation de l'eau).

10 b. Ou bien : enfoncer le cylindre dans le sol humide, le retirer plein de terre et le peser « à saturation », puis :

- le reposer 24 et 48 heures après drainage sur bac à sable (= Hv % à capacité au champ = microporosité) ;
- le sécher à 105 °C (= densité apparente) ;
- le broyer, faire bouillir durant quatre heures 100 g de sol, refroidir puis verser dans un ballon jaugé de 200 cm³ (en déduire la densité réelle).

$$\text{Porosité totale} = \frac{(d \text{ réelle} - d \text{ apparente})}{d \text{ réelle}} \times 100$$

11. Sur le terrain, dégager une fosse coupant la tache humide au centre du cylindre initial jusqu'à atteindre la limite de la tache d'humectation.

12. Dessiner la forme de la tache dans la direction perpendiculaire à la pente, mesurer :

- la profondeur humectée ;
- les diamètres tous les 5 cm, dont on déduit le diamètre moyen.

13. Refermer le trou et poser une couverture isolante contre l'évaporation, le ruissellement et l'infiltration des pluies. Prélever à nouveau au bout de 24 à 48 heures (= capacité au champ, deuxième approche).

La sensibilité du test est telle qu'il faut prévoir au minimum cinq répétitions et écarter les mégapores visibles au niveau de la tache d'humectation. La répétition des mesures sur une tranchée en escalier permet au premier coup d'œil de repérer le fonctionnement hydrique de chaque horizon du profil pédologique par rapport au suivant.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Forme de la tache

Si le sol est sableux et très perméable, la tache aura la forme d'un cylindre (fig. 1 a).

Si le sol est sablo-limoneux ou argileux, la tache prendra la forme d'un ballon ou d'un cône renversé à cause de la succion latérale dans les micropores (fig. 1 b).

Si le sol est tassé, l'infiltration est lente, la succion latérale importante, et la tache prend la forme d'une coupe évasée (fig. 1 c).

Enfin, si le sol est formé d'un horizon perméable sur un horizon peu perméable, la tache s'étale sur ce dernier

et forme un champignon renversé. S'il y a un drainage oblique vers le bas de la toposéquence, la tache indiquera le sens du drainage oblique (fig. 1 d).

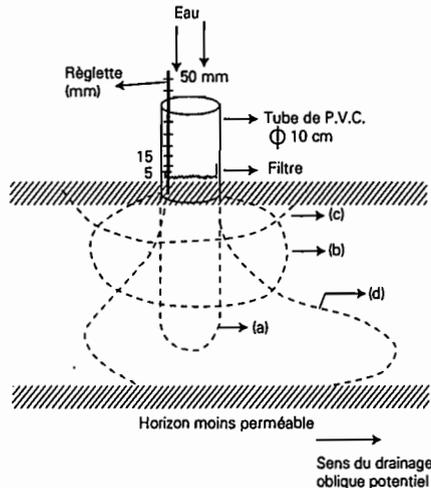


FIG. 1. — Forme des taches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des horizons du sol : a) sol sableux très perméable ; b) sol sablo-argileux à porosité fine ; c) sol peu perméable, tassé ou battu par la pluie ; d) horizon perméable sur un horizon moins poreux avec tendance au drainage oblique.

Shape of moistening spots as related to the hydrodynamic features of soil horizons : a) highly permeable sandy soil ; b) clay sand soil with fine porosity ; c) weakly permeable, compacted or rain soaked soil ; d) permeable horizon on a less porous horizon with a tendency to oblique drainage.

Infiltration moyenne d'une lame de 50 mm

Généralement, le temps d'infiltration d'une lame de 50 mm varie de 1 à 60 minutes en fonction de la structure et de l'humidité préalable du sol, de la fissuration visible ou non, des états de surface et de la stabilité de la structure. Sur les sols instables, la capacité d'infiltration diminue sérieusement après un premier test sur sol sec.

Vitesse d'infiltration finale

Pour approcher la capacité d'infiltration du sol en milieu saturé, on arrose de deux fois 50 mm pour éviter les fuites latérales de l'eau sous pression dans le cylindre.

Le front d'humectation dépasse alors 12 à 30 cm de profondeur. On attend que la lame d'eau soit faible (entre 15 et 5 mm) pour déterminer la capacité d'infiltration finale sous faible pression.

On obtient alors les courbes suivantes :

— sols sableux ou sols stables à comportement sableux : deux droites à pente raide selon l'humectation initiale du sol (fig. 2 a et a') ;

— sols (limoneux) instables : courbe tangente à l'axe du temps (fig. 2 b).

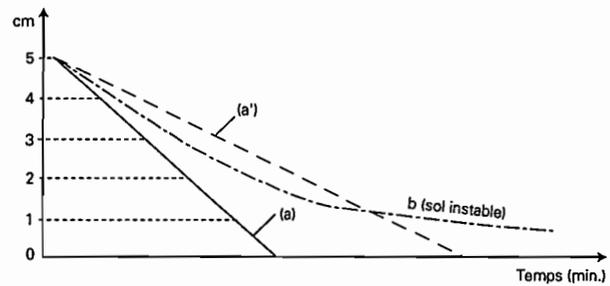


FIG. 2. — Dynamique de l'infiltration : a) sur un horizon sableux sec ; a') sur le même horizon après humectation ; b) sur un horizon peu stable à l'eau.

Infiltration dynamics : a) on a dry sandy horizon ; a') on the same horizon after moistening ; b) on an horizon weakly stable to water.

Correction en fonction du volume de la tache

Théoriquement, s'il n'y avait qu'une succion verticale, la tache devrait rester cylindrique. En réalité, comme la mesure se fait avec un seul anneau, il y a une succion latérale d'autant plus forte que le milieu est dense, compact ou argilo-limoneux.

Il faut donc corriger les valeurs d'infiltration finale en fonction du rapport entre le volume de la tache et le volume du cylindre théorique.

$$\frac{\text{volume tache}}{\text{volume cylindre}} = \frac{\pi \cdot H \cdot R^2}{\pi \cdot H \cdot r^2} = \frac{R^2}{r^2}$$

Le facteur de correction varie de 2 à 6 sur sols sableux ou « sols stables à comportement sableux » et de 4 à 8 sur sols limono-argileux peu perméables, tassés ou instables.

Capacité d'infiltration corrigée

Pour tenir compte de la succion latérale indiquée par la forme de la tache, on calcule le coefficient de correction à partir du rayon moyen sur l'ensemble de la hauteur de la tache (R). On divise l'infiltration finale par le coefficient de correction (correction = 2 à 8) :

$$\text{FN corrigée} = \text{FN} \frac{R^2}{r^2} \quad (\text{en mm/h})$$

Plus le coefficient de correction est élevé, plus les risques de drainage oblique sont forts.

Mesures complémentaires

Pour compléter la description des caractéristiques hydrodynamiques, on peut prélever :

— un cylindre pour estimer la densité apparente puis la densité réelle, l'humidité maximale, la capacité au champ et la microporosité ;

— un échantillon de sol après 24 heures de drainage : il aura atteint l'humidité de la capacité au champ ;

— un échantillon de sol pour mesurer au laboratoire les courbes de rétention et le point de flétrissement ($pF = 4,2$).

À partir de la différence entre ces diverses humidités, on pourra estimer :

- la macroporosité efficace pour la circulation de l'eau et de l'air ;
- la microporosité ;
- l'eau fixée et, par différence, la réserve en eau utile pour les cultures.

ÉTUDES DE CAS

Sols ferrallitiques argileux rouge et jaune du Brésil

À l'examen du tableau II, on peut observer que la capacité d'infiltration corrigée (à saturation) varie de moins de 100 mm/h sur un terrain tassé (vieille pâture dégradée ou passage du tracteur) à plus de 400 mm/h sur un sol perméable (semis direct ou labour).

TABLEAU II
Capacité d'infiltration (moyenne et corrigée), profondeur humectée, coefficients de correction et diamètre moyen des taches d'humectation dans les sols ferrallitiques du Brésil soumis à diverses utilisations
Infiltration capacity (mean and corrected), moistened depth, correction coefficients and mean diameter of moistening spots in the Brazilian ferrallitic soils subjected to various uses

	Infiltration moyenne (mm/h)	Infiltration finale (mm/h)	Diamètre moyen de la tache (cm)	Profondeur humectée cm	Coefficient correction	Infiltrat. finale corrigée (mm/h)
A. Sol ferrallitique argileux rouge sombre (Goiânia)						
Labour avec pulvérisateur offset "cover-crop" sur culture irriguée de haricot						
Répétition 1 (août 1994)	1745	1440	16,0	16,0	2,8	554
Répétition 2 (août 1994)	1370	973	16,0	15,0	2,6	380
Semis direct (sans labour) sur culture irriguée de haricot sur résidus de maïs						
Répétition 1 (août 1993)	1066	1091	16,6	13,0	2,8	395
Répétition 2 (août 1994)	1014	667	18,8	15,0	3,5	189
Répétition 3 (oct. 1994)	621	517	20,0	18,0	4,0	129
Répétition 4 (oct. 1994)	1486	1154	20,7	17,5	4,3	269
Répétition 5 (oct. 1994)	1446	1035	15,4	27,0	2,4	437
Bord du champ tassé par le passage des engins						
Répétition 1 (août 1993)	377	242	15,0	7,0	2,3	108
B. Sol ferrallitique argileux, sous pâture dégradé (Morrinhos)						
Sol rouge jaunâtre						
Répétition 1	140	89	26,7	26,0	7,2	12
Répétition 2	43	24	46,5	15,0	21,6	1
Sol rouge sombre						
Répétition 1	449	284	18,0	30,0	3,2	88
Répétition 2	291	180	24,0	22,0	5,8	31

L'engorgement et le tassement du sol réduisent fortement la capacité d'infiltration : la forme évasée de la tache d'humectation le confirme.

La présence de fissures profondes augmente nettement la capacité d'infiltration (jusqu'à plus de 1 000 mm/h) et se marque au niveau de la tache (FN = 1 à 12 mm/h) (voir semis direct, troisième répétition).

Les sols jaunes ferrallitiques semblent beaucoup plus sensibles au surpâturage que les sols rouges ferrallitiques (31 à 88 mm/h).

Sol ferrugineux tropical sableux du Nord-Cameroun

L'étude de la capacité d'infiltration de chaque horizon d'un profil type a montré que les taches d'humectation ont

une forme de demi-ballon très semblable, qu'il n'y a aucun étalement au-dessus de l'horizon sous-jacent (donc de perméabilité voisine) et que les ordres de grandeur sont très semblables (tabl. III) :

— la FN corrigée diminue progressivement de 145 à 63 mm/h ;

— la capacité d'infiltration varie énormément en fonction de l'état de la surface du sol : de plus de 200 mm/h sur sol motteux ou sous jachère active biologiquement (beaucoup de vers de terre et de termites) ; de 30 à 60 mm/h sur pellicule de battance (1 mm d'épaisseur) en fonction de l'humidité préalable du sol ; de 5 à 30 mm/h sur croûtes de sédimentation.

TABLEAU III

Capacité d'infiltration d'une lame d'eau dans un cylindre, profondeur de sol humecté et forme de la tache d'humectation dans un sol ferrugineux tropical sableux nouvellement défriché (ROOSE, 1991)

Infiltration capacity of a rainfall depth in a cylinder, depth of moistened soil and shape of the moistening spot in a newly cleared sandy ferruginous tropical soil (ROOSE, 1991)

	Temps (min) pour infiltrer 100 mm	Profondeur humectée (cm)	Infiltration finale corrigée (mm/h)	Forme de la tache
Sous jachère				
- sous une touffe de graminée	1	25	250	cylindre
- sous turricule de vers de terre jeune	2	24	210	cylindre
- sous termitière vivante	50	-	20	-
Profil sous jeune défriche (bloc A)				
- horizon gris 0-15 cm	9 (12 à 24)	14 (17 à 20)	145 (52 à 64)	demi-ballon
- horizon brun-gris 20-45 cm	10 (12 à 18)	12 (17 à 20)	96 (48 à 64)	demi-ballon
- horizon brun 60-70 cm	18 (12 à 16)	13 -	63 (41 à 73)	demi-ballon
- horizon brun-rouge 120 cm	14 -	17 -	79 -	demi-ballon
Différences dues à l'état de surface				
- A 8 non dégradé	11	19	135	demi-ballon
- A 9 tassé, dénudé	23	15	60	coupe évasée
- coulée de sable	20	15	80	coupe évasée
- surface dégradée/pellicule battance	45	12	35	coupe évasée
- croûte de sédimentation	80	12	28	coupe très évasée

Entre parenthèses : mesures en humide.

DISCUSSION

Comme pour tous les tests de terrain, l'application du test au cylindre unique s'avère avantageuse dans certaines circonstances (si les états de surface sont très évolués, s'il y a des variations nettes des horizons) mais décevante dans d'autres (travail du sol fraîchement effectué, présence de fissures ou de cailloux).

Avantages

C'est un test très simple, peu coûteux, peu exigeant en matériel, en eau et en temps.

Il peut fournir de nombreuses informations sur le fonctionnement hydrique des différents horizons d'un sol ou d'une toposéquence ; il permet de classer les états de surface, les horizons et les sols en fonction de leurs propriétés hydrodynamiques ; il permet également d'analyser en détail les états de surface et leur évolution au cours d'une saison culturale ; il permet enfin des mesures en place même sur des pentes fortes.

Limites

Ce n'est qu'un test comparatif et non une mesure absolue : les sols sont souvent des milieux si hétérogènes

qu'il est nécessaire de faire de nombreuses répétitions (cinq au minimum) dont on compare les médianes.

La surface de mesure (100 cm²) n'intègre pas toujours toute la maille de l'hétérogénéité. On peut tenter d'augmenter le diamètre du cylindre, mais dans ce cas on augmente la consommation d'eau et on ne peut plus travailler sur les pentes fortes.

Il n'est pas toujours facile d'étanchéifier le contact sol-cylindre, en particulier sur les sols sableux, caillouteux, fissurés ou tassés : on augmente alors artificiellement les valeurs de la capacité d'infiltration.

Les valeurs observées sont généralement supérieures d'un ordre de grandeur à la capacité d'infiltration finale obtenue au simulateur, mais, en corrigeant les valeurs finales par le rapport des volumes tache mouillée/cylindre théorique, nous avons obtenu des capacités d'infiltration corrigées de 10 à 500 mm/h, du même ordre que celles obtenues par le simulateur de pluie.

On ne peut estimer l'effet de la rugosité sur la pluie d'imbibition (comme avec le simulateur de pluie) et les mesures sont généralement supérieures à la réalité sous la pluie battante, si bien qu'il est difficile de comparer cette estimation de l'infiltration aux intensités de la pluie pour estimer directement le risque de ruissellement. Ce n'est qu'une approche semi-quantitative, relative, comparative.

Il faut absolument verser l'eau dans le cylindre avec soin et amortir l'énergie de chute à l'aide des doigts ou

d'une cuillère sans remuer la surface du sol ; sans quoi il se forme une suspension qui va se déposer et former une croûte artificielle.

Cette technique est peu adaptée aux sols fissurés secs (vertisols et sols fraîchement travaillés) : il faut attendre leur tassement, leur enracinement et leur humectation (mais alors on ne peut plus distinguer correctement les limites de la tache d'humidité).

CONCLUSION

Le test du monocylindre et les mesures associées peuvent être très utiles pour les pédologues et les agronomes de terrain qui ne disposent pas toujours des facilités d'un laboratoire et souhaitent disposer très vite de résultats essentiels comme la capacité d'infiltration, les risques d'engorgement au-dessus d'un horizon, la macroporosité, la réserve utile en eau de chaque horizon.

Les observations sur la tache humide viennent compléter les informations obtenues à travers les profils culturaux et les profils racinaires sur le mode de circulation de l'eau sur et dans le sol, en fonction du système de culture et de la position du profil dans la toposéquence.

Des études complémentaires seraient utiles pour comparer les mesures de terrain avec les résultats des tests plus sophistiqués de laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978 — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 15 (4) : 321-349.
- AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.-X.), ROOSE (E.), VIZIER (J.-F.), 1973 — *Bulletin du Groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols*. Paris, Orstom, 133 p.
- BOIFFIN (J.), 1984 — *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse doct.-ing., Ina-PG, Paris, 320 p.
- BOIVIN (P.), TOUMA (J.), 1988 — Variabilité spatiale de l'infiltrabilité d'un sol mesurée par la méthode du double anneau. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 24 (3) : 227-234.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967 — *Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : République de Côte d'Ivoire*. Orstom-CIEH, 20 p.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989 — *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 232 p.
- COSANDEY (C.), BOUDJEMLINE (D. J.), ROOSE (E.), LELONG (F.), 1990 — Étude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozère (France). *Zeit. Geomorphol. N.F.*, 34 (1) : 61-73.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976 — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 13 (3) : 179-194.
- ROOSE (E.), 1973 — *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. Thèse doct.-ing., fac. Sciences, Abidjan, 125 p.
- ROOSE (E.), 1991 — *Compte rendu de la troisième mission au Nord-Cameroun*. Montpellier, Orstom, Ira, 6 p.

Cahiers Orstom, sér. Pédologie, vol. XXVIII

TABLE ANNUELLE 1993

Adaptation du système international (SI) à la chimie des sols	137
AMABILE (R. F.) — <i>cf.</i> BLANCANEAUX (P.)	253
ARABI (A.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	289
ASSELIN (J.), DE NONI (G.), NOUVELOT (J.-F.), ROOSE (É.) — Note sur la conception et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement	405
AZONTONDE (A.) — Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin	217
BARET (F.) — <i>cf.</i> JACQUEMOUD (S.)	31
BASSISTY (E.) — <i>cf.</i> MANIÈRE (R.)	67
BEP A ZIEM (B.) — <i>cf.</i> BOLI (B. Z.)	309
BLANCANEAUX (P.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	413
BLANCANEAUX (P.), DE FREITAS (P. L.), AMABILE (R. F.), DE CARVALHO (A.) — Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central	253
BOLI (B. Z.), ROOSE (É.), BEP A ZIEM (B.), SANON (K.), WAECHTER (F.) — Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux. Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992)	309
BRABANT (P.) — Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ?	107
BRAHAMIA (K.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	289
CELLES (J.-C.) — <i>cf.</i> MANIÈRE (R.)	67
CERVELLE (B.) — <i>cf.</i> DEDIDI (A.)	7
CHEBBANI (R.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	289
COLLINET (J.), MAZARIEGO (M.) — Réhabilitation de sols volcaniques dégradés à l'aide d'amendements organiques au Salvador (Amérique centrale)	187
DE CARVALHO (A.) — <i>cf.</i> BLANCANEAUX (P.)	253
DE FREITAS (P. L.) — <i>cf.</i> BLANCANEAUX (P.)	253
DE FREITAS (P. L.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	413

DE NONI (G.) — <i>cf.</i> ASSELINE (J.)	405
DE NONI (G.), VIENNOT (M.) — Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquence sur la durabilité des agrosystèmes andins	277
DEDIDI (A.), CERVELLE (B.) — Diffusion de la lumière par des particules minérales	7
DUGUÉ (P.), ROOSE (É.), RODRIGUEZ (L.) — L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso). Une expérience de recherche-développement	385
ESCADAFAL (R.), GOUINAUD (C.), MATHIEU (R.), POUGET (M.) — Le spectroradiomètre de terrain : un outil de la télédétection et de la pédologie	15
FLORET (C.) — <i>cf.</i> MASSE (D.)	203
FOTSING (J.-M.) — Érosion des terres cultivées et propositions de gestion conservatoire des sols en pays bamiléké (Ouest-Cameroun)	351
GOUINAUD (C.) — <i>cf.</i> ESCADAFAL (R.)	15
GUENAT (C.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	159
HANOCQ (J.-F.) — <i>cf.</i> JACQUEMOUD (S.)	31
HENQUIN (B.), TOTTE (M.) — Le traitement d'un modèle numérique de terrain pour la caractérisation du milieu physique. Cas d'étude dans le sud-ouest du Burkina Faso	55
JACQUEMOUD (S.), BARET (F.), HANOCQ (J.-F.) — Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols. Application au concept de droite des sols	31
KABORE (V.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	159
KING (C.) — <i>cf.</i> MATHIEU (R.)	81
LE BISSONNAIS (Y.) — <i>cf.</i> MATHIEU (R.)	81
MANIÈRE (R.), BASSISTY (E.), CELLES (J.-C.), MELZI (S.) — Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : exemples d'Aïn Oussera (Algérie)	67
MASSE (D.), FLORET (C.), PONTANIER (R.), SEINY BOUKAR (L.) — Amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés du Nord-Cameroun en vue de leur réhabilitation	203
MATHIEU (R.) — <i>cf.</i> ESCADAFAL (R.)	15
MATHIEU (R.), KING (C.), LE BISSONNAIS (Y.) — Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion. L'exemple des sols limoneux du nord de la France	81
MAZARIEGO (M.) — <i>cf.</i> COLLINET (J.)	187
MAZOUR (M.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	289
MELZI (S.) — <i>cf.</i> MANIÈRE (R.)	67
MORSLI (B.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	289
MOUGENOT (B.) — Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés	45
NDAYIZIGIYE (F.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	327

NOUVELOT (J.-F.) — <i>cf.</i> ASSELINE (J.)	405
PONTANIER (R.) — <i>cf.</i> MASSE (D.)	203
POUGET (M.) — <i>cf.</i> ESCADAFAL (R.)	15
PRAT (C.) — <i>cf.</i> QUANTIN (P.)	175
QUANTIN (P.), PRAT (C.), ZEBROWSKI (C.) — Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique	175
RISHIRUMUHIRWA (T.) — Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi	367
RODRIGUEZ (L.) — <i>cf.</i> DUGUÉ (P.)	385
ROOSE (É.) — <i>cf.</i> ASSELINE (J.)	405
ROOSE (É.) — <i>cf.</i> BOLI (B. Z.)	309
ROOSE (É.) — <i>cf.</i> DUGUÉ (P.)	385
ROOSE (É.) — Innovations dans la conservation et la restauration des sols	147
ROOSE (É.), ARABI (A.), BRAHAMIA (K.), CHEBBANI (R.), MAZOUR (M.), MORSLI (B.) — Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion	289
ROOSE (É.), BLANCANEUX (P.), DE FREITAS (P. L.) — Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples	413
ROOSE (É.), KABORE (V.), GUENAT (C.) — Le zaï. Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso)	159
ROOSE (É.), NDAYIZIGIYE (F.), SEKAYANGE (L.) — L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ?	327
SANON (K.) — <i>cf.</i> BOLI (B. Z.)	309
SEKAYANGE (L.) — <i>cf.</i> ROOSE (É.)	327
SEYLER (F.), VOLKOFF (B.) — Spatialisation d'une étude pédologique localisée sous forêt tropicale dense à l'aide d'une image	95
SEINY BOUKAR (L.) — <i>cf.</i> MASSE (D.)	203
SMOLIKOWSKI (B.) — La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti. Cas du transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin dans le sud d'Haïti	229
TOTTÉ (M.) — <i>cf.</i> HENQUIN (B.)	55
VIENNOT (M.) — <i>cf.</i> DE NONI (G.)	277

VOLKOFF (B.) — <i>cf.</i> SEYLER (F.)	95
WAECHTER (F.) — <i>cf.</i> BOLI (B. Z.)	309
ZEBROWSKI (C.) — <i>cf.</i> QUANTIN (P.)	175

Photocomposition et impression
réalisées par



31240 L'UNION (Toulouse)
Tél. 05 61 37 64 70
Dépôt légal : décembre 1996

Sommaire / Contents

Spécial Érosion

ROOSE (E.) — Présentation : Innovations dans la conservation et la restauration des sols/Presentation	147
La réhabilitation des sols/Soil rehabilitation	157
ROOSE (E.), KABORE (V.), GUENAT (C.) — Le zaï. Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso)/The "zaï": functioning, limits and improvement of a traditional African practice for the rehabilitation of degraded lands in semi-arid areas (Burkina Faso)	159
QUANTIN (P.), PRAT (C.), ZEBROWSKI (C.) — Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique/Soil restoration and conservation of the "tepetates" indurated volcanic soils in the Mexico and Tlaxcala States (Mexico)	175
COLLINET (J.), MAZARIEGO (M.) — Réhabilitation de sols volcaniques dégradés à l'aide d'amendements organiques au Salvador (Amérique centrale)/Rehabilitation of volcanic soils degraded by anthropic erosion with different types of organic fertilizers in El Salvador (Central America)	187
MASSE (D.), FLORET (C.), PONTANIER (R.), SEINY BOUKAR (L.) — Amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés du Nord-Cameroun en vue de leur réhabilitation/Soil water balance improvement of the degraded vertisols in Northern-Cameroon for their rehabilitation	203
AZONTONDE (A.) — Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin/Degradation and restoration of "terres de Barre" in Benin	217
La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols/The water and soil fertility management	227
SMOLIKOWSKI (B.) — La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti. Cas du transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin dans le sud d'Haïti/The water and soil fertility management (GCES): A new strategy for fighting erosion in Haïti	229
BLANCANEUX (P.), DE FREITAS (P. L.), AMABILE (R. F.), DE CARVALHO (A.) — Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central/The "no tillage system" as conservationist practice in soil of cerrados of Center-Western region of Brazil	253
DE NONI (G.), VIENNOT (M.) — Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquences sur la durabilité des agrosystèmes andins/Recent changes in Ecuadorean agriculture and the consequences for the sustainability of Andean agrosystems	277
ROOSE (E.), ARABI (M.), BRAHAMIA (K.), CHEBBANI (R.), MAZOUR (M.), MORSLI (B.) — Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion/Sheet erosion and runoff in Algerian mediterranean mountain. Reduction of erosion hazards and intensification of the agricultural production by GCES: synthesis of the 1984-1995 campaigns on a network of 50 runoff plots	289
BOLI (B. Z.), ROOSE (E.), BEP A ZIEM (B.), SANON (K.), WAECHTER (F.) — Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux. Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992)/Effects of cultural practices on runoff, soil erosion and yield of cotton and maize on a sandy alfisol. Intensive and sustainable cropping systems research in the sudanese zone of North-Cameroon.	309
ROOSE (E.), NDAYIZIGIYE (F.), SEKAYANGE (L.) — L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. Comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population ?/Agroforestry and land husbandry in Rwanda. How to restore the acid soils productivity in tropical mountains densely populated ?	327
FOTSING (J.-M.) — Érosion des terres cultivées et propositions de gestion conservatoire des sols en pays bamiléké (Ouest-Cameroun)/Erosion of cultivated lands and some recommendations for soil crop management in the Bamileke country (Western Cameroon)	351
RISHIRUMUHIRWA (T.) — Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi/Potentialities of the banana tree in the management and conservation of acid ferralitic soils in Burundi	367
DUGUÉ (P.), ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.) — L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso). Une expérience de recherche-développement/The development of rural soils and the improvement of the agricultural production in Yatenga (Burkina Faso). A research-development experiment	385
Les techniques de mesure/Measurement practices	403
ASSELIN (J.), DE NONI (G.), NOUVELOT (J.-F.), ROOSE (E.) — Note sur la conception et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement/About the design and the use of a runoff simulator	405
ROOSE (E.), BLANCANEUX (P.), DE FREITAS (P. L.) — Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples/A simple field test for evaluation of the infiltration capacity and the hydrodynamic behaviour of surface soil horizons: method and examples	413
Table annuelle 1993/Annual table 1993	421