

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).

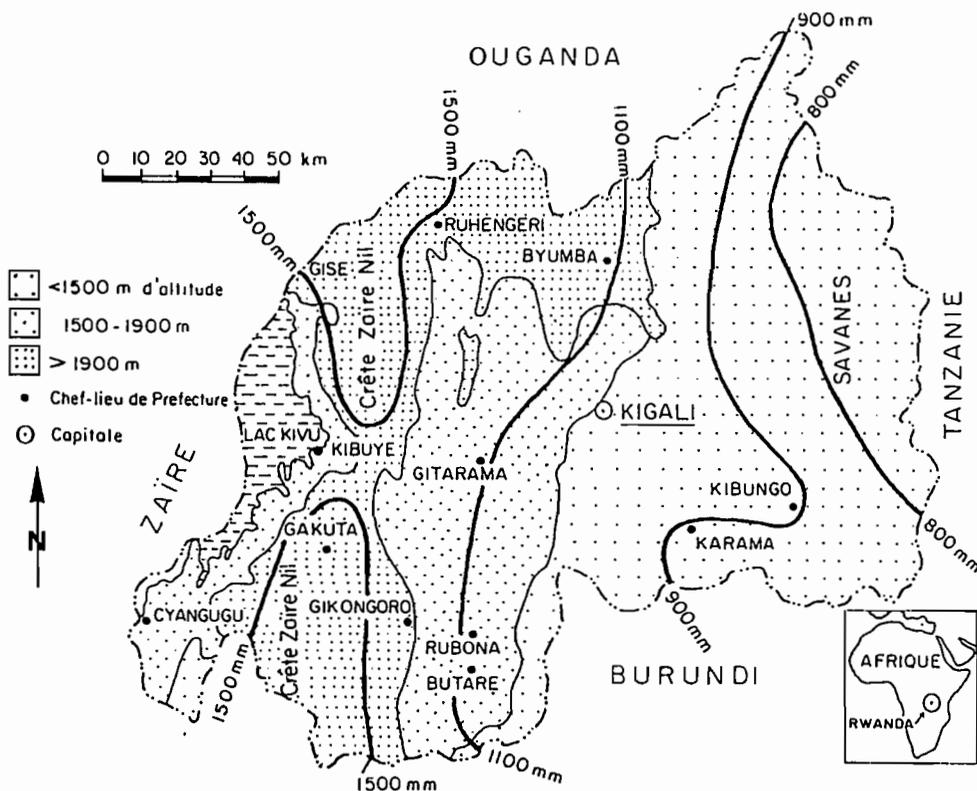


FIG. 1. — Carte des zones agroécologiques du Rwanda en fonction de l'altitude (< 1 500 m, < 1 900 m, > 1 900 m) et des précipitations (< 900 mm, < 1 500 mm, > 1 500 mm). D'après DELEPIERRE, 1982.

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 ; GUICHAOUA, 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).

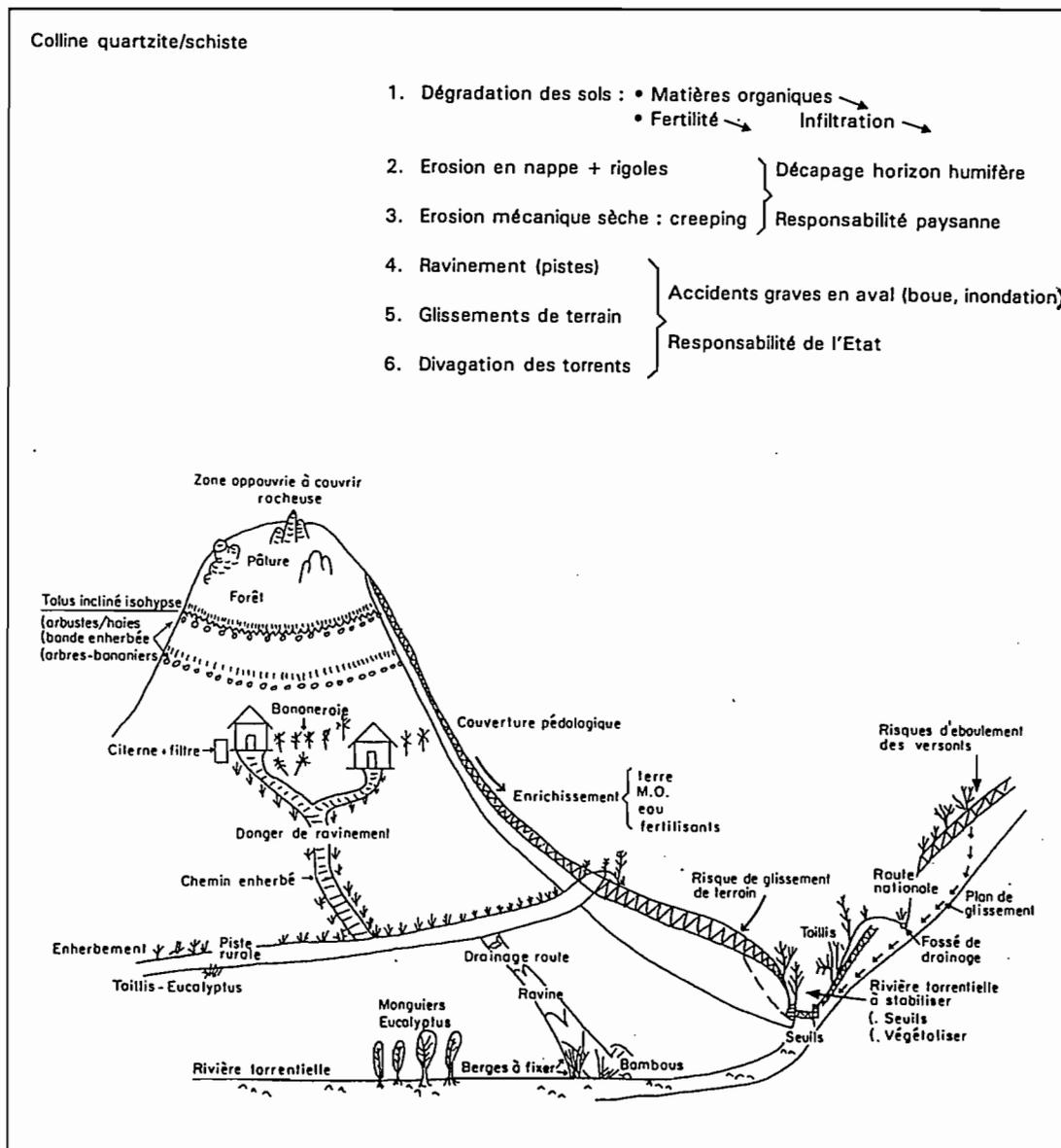


FIG. 2. — Six processus d'érosion aboutissant à la dégradation du milieu rural. D'après ROOSE, 1992. Six erosion processes are degrading rural environment. After ROOSE, 1992.

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 sylvoicoles 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.

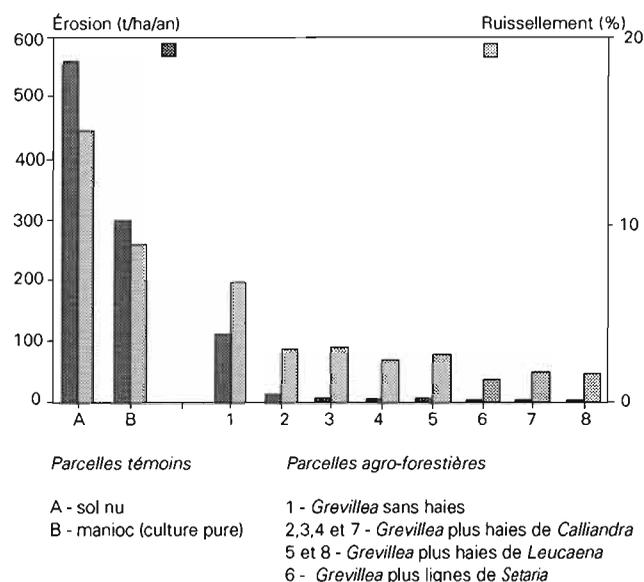


FIG. 3. — Agroforesterie et érosion à la station Pasi de Ruhandé/Butaré. D'après KÖNIG, 1992.

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 1 770 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).

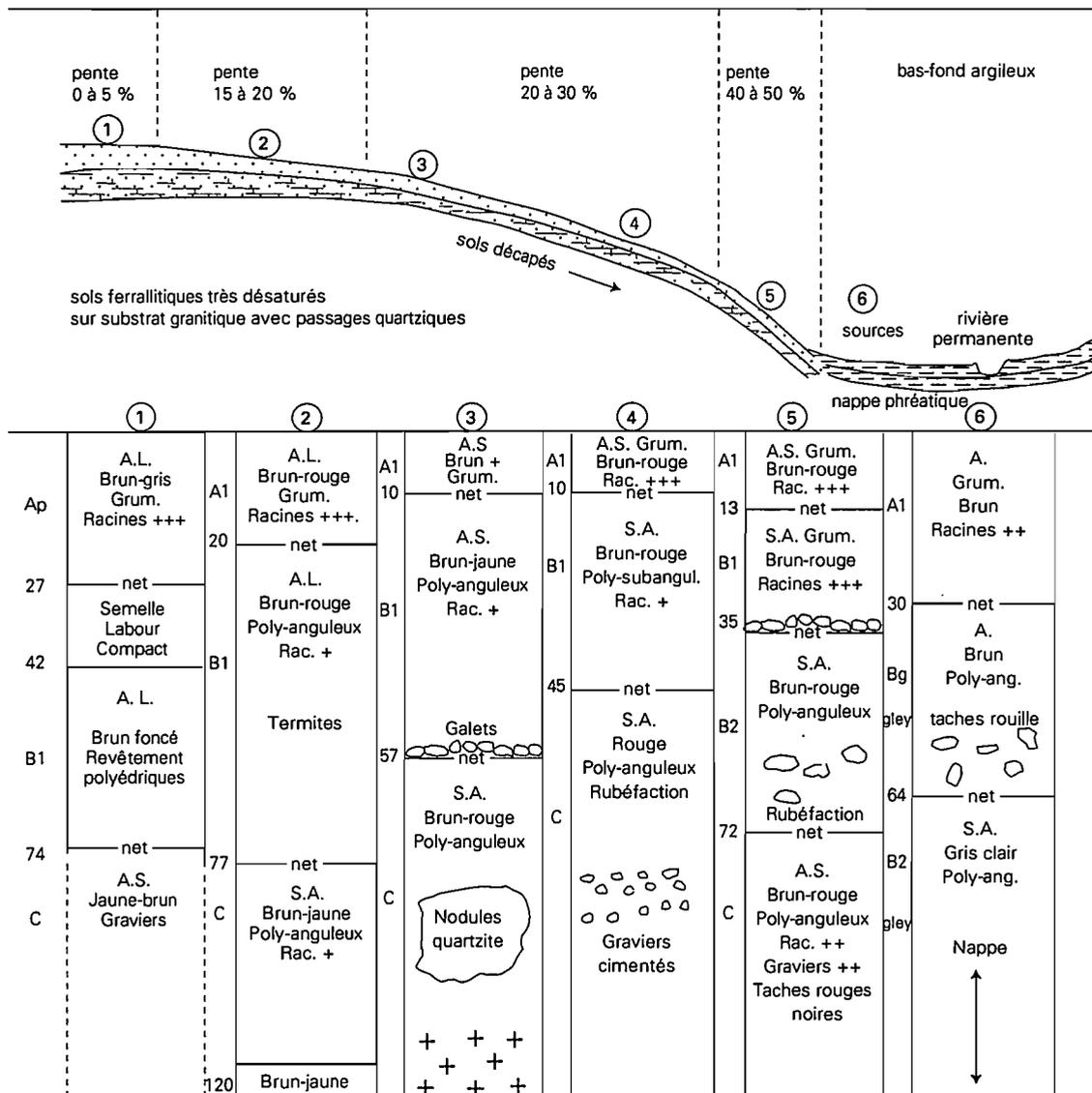


FIG. 4. — Toposéquence des parcelles d'érosion à la station Isar de Rubona. D'après NDAYIZIGIYE, 1993 b. Le taux d'argile croît en profondeur (de 40 % en surface à 60 % au-delà de 40 cm) et vers le bas du versant. L'horizon humifère est pauvre (C = 1,5 à 2 % ; C/N = 10 ; Al éch. = 3 méq/100 g ; Ca éch. = 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

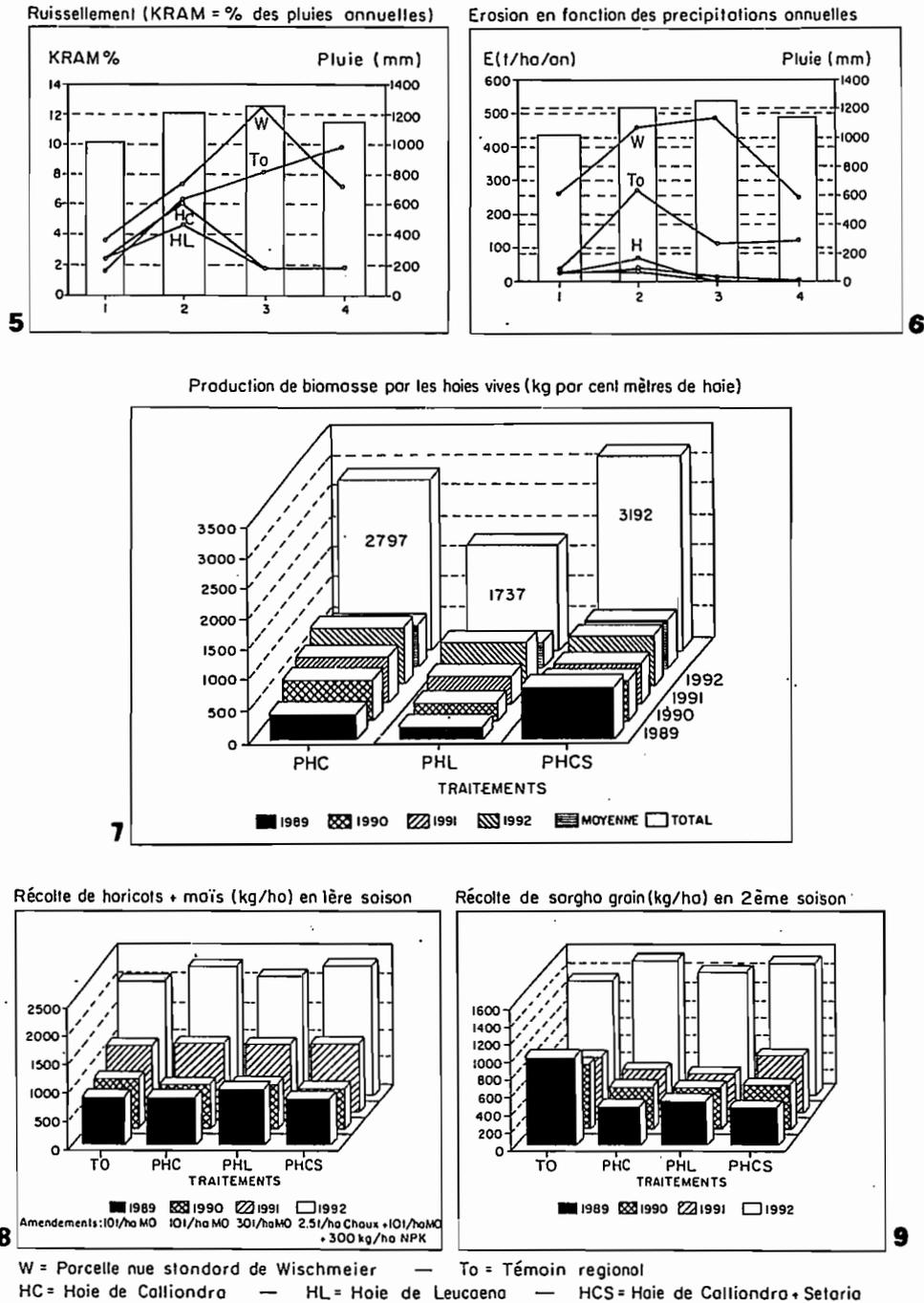


FIG. 5, 6, 7, 8, 9. — Influence de trois haies vives sur le ruissellement (5), l'érosion (6), la production de biomasse (7), la récolte des deux saisons à la station de Rubona (pente de 23 %) (8 et 9). D'après NDAYIZIGIYE, 1993.

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'émondes (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

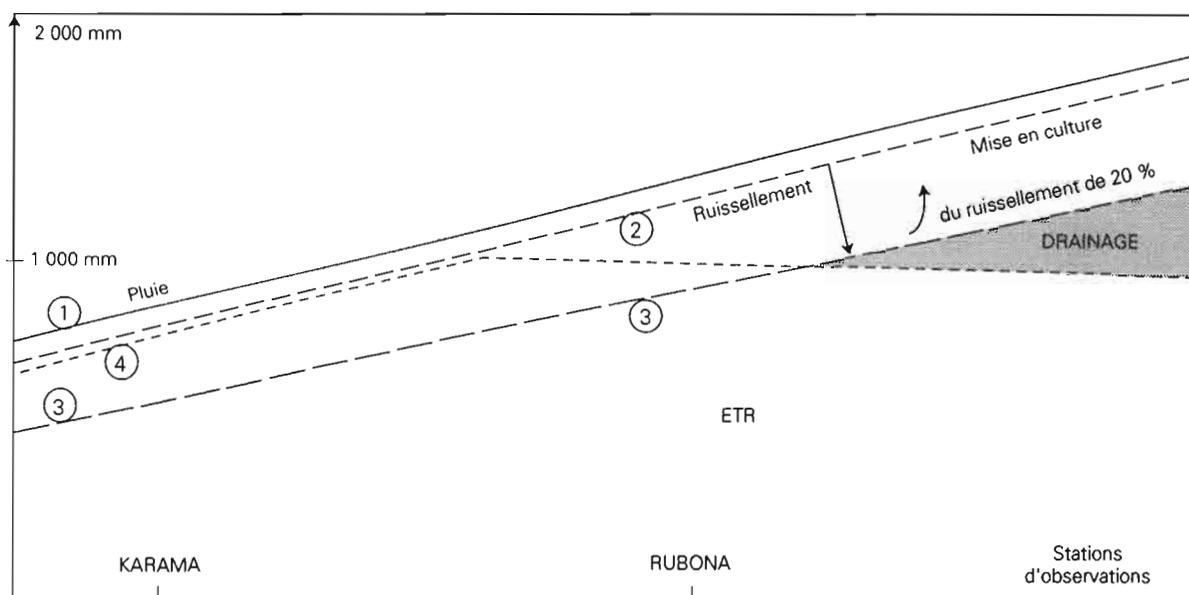
Les résultats exposés ci-dessus confirment l'intérêt, en montagne tropicale densément peuplée, de l'introduction de certaines espèces d'arbres et d'arbustes dans ces systèmes agropastoraux pour intensifier la production, par l'amélioration de la gestion des eaux superficielles, de la matière organique 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

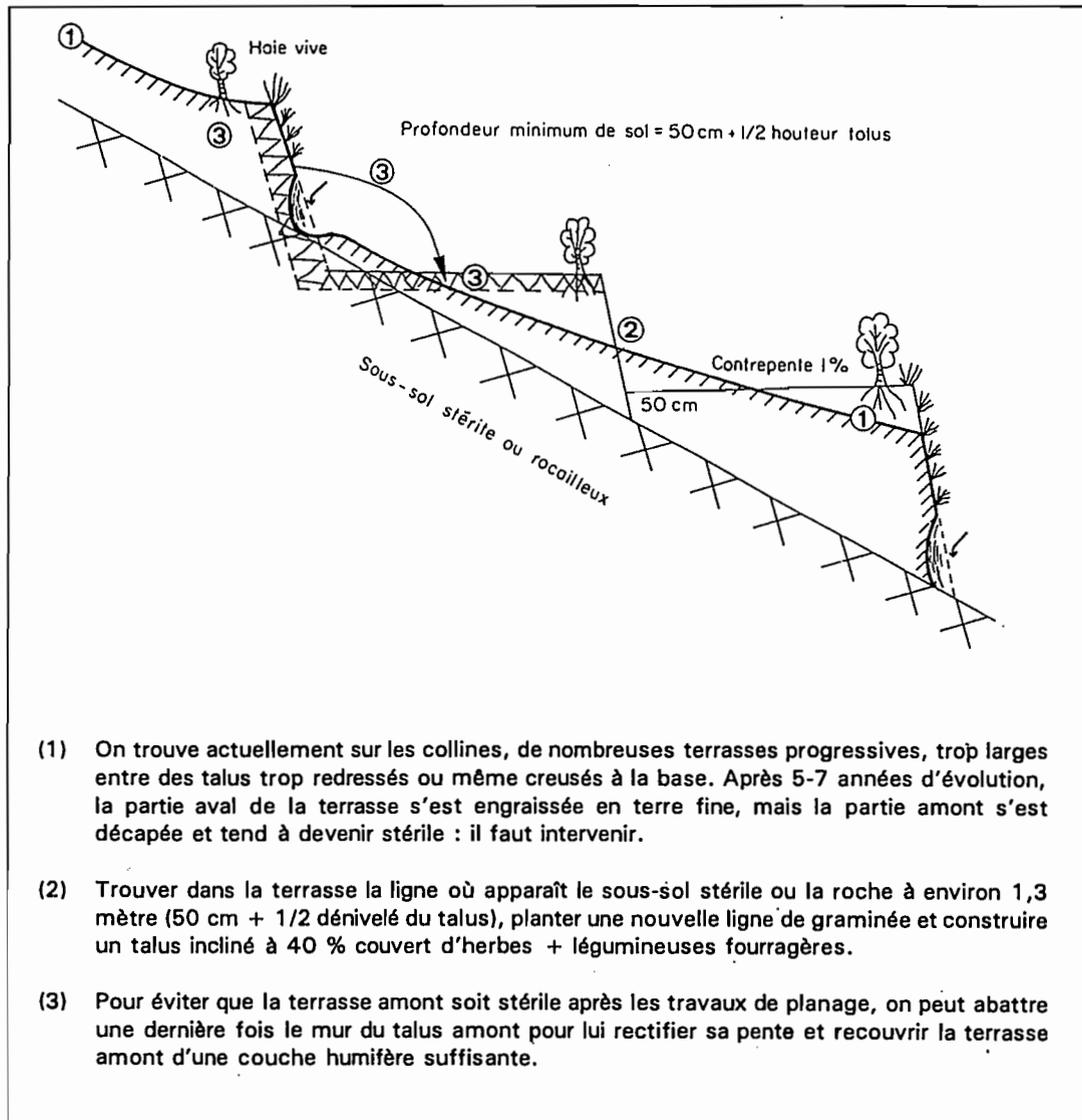


FIG. 11. — Évolution des terrasses progressives en gradins horizontaux. D'après GALLIKER, 1992.
Evolution of progressive to horizontal terraces. After GALLIKER, 1992.

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 défrichement (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.

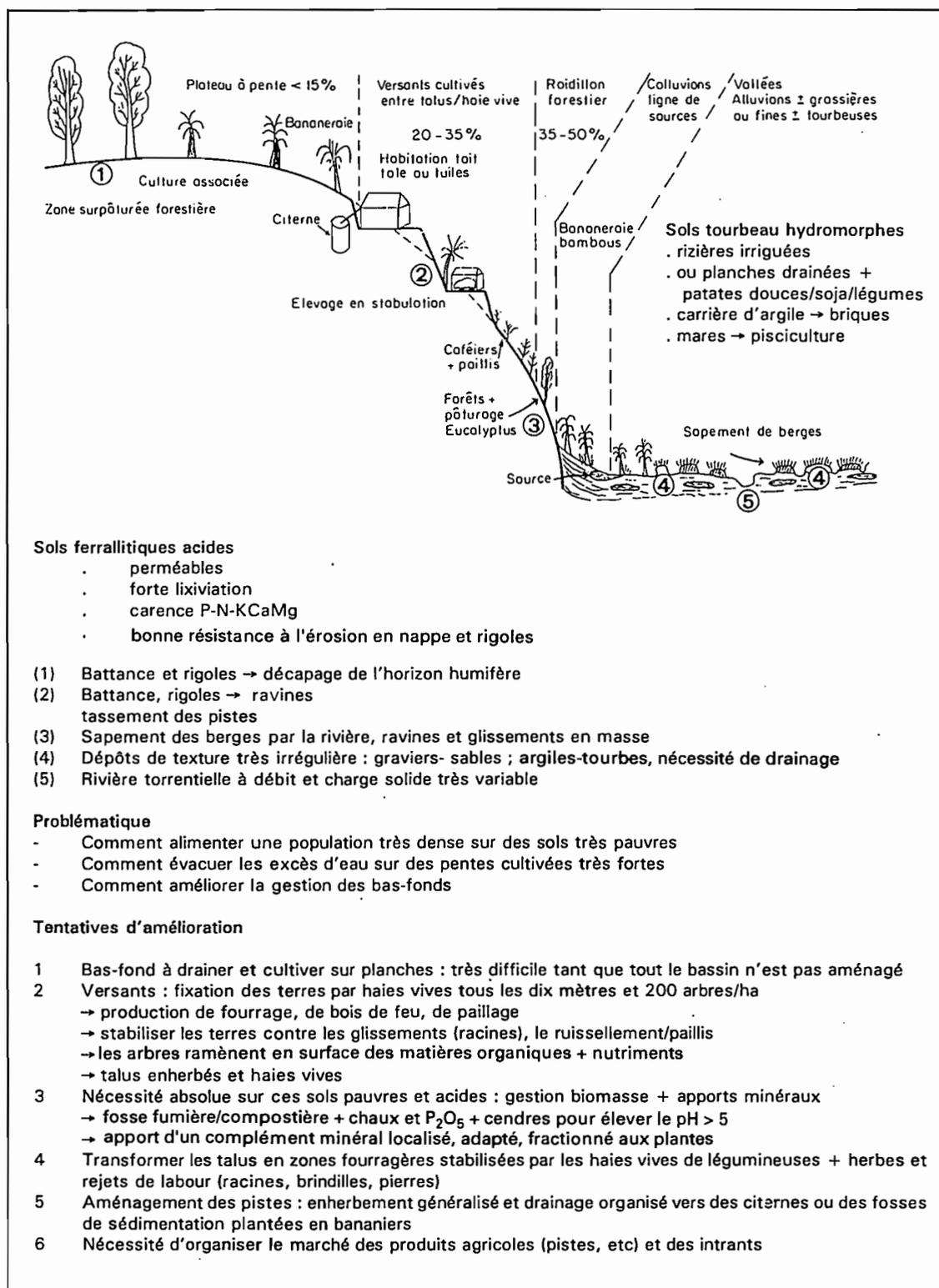


FIG. 12. — Risques d'érosion et propositions d'aménagement des collines granito-gneissiques du Rwanda. D'après ROOSE, 1994. *Erosion risks and management proposal for large granitic-gneiss hillslopes in Rwanda. After ROOSE, 1994.*

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.
- DUCHAUFOUR (H.), 1991 — Bilan de dix ans de recherches en parcelles et bassin versant au Burundi. *Bull. Réseau Érosion*, 11 : 36-37.
- DUCHAUFOUR (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.

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 antiseptique) et au décapage de l'horizon humifère par l'érosion.

