

ORSTOM

CNEARC

**INTRODUCTION A LA GESTION CONSERVATOIRE
DE L'EAU, DE LA BIOMASSE ET
DE LA FERTILITE DES SOLS**

G.C.E.S.

Stratégie nouvelle de lutte antiérosive

Outil de la gestion de terroir

Eric Roose

Directeur de Recherche en Pédologie à l'ORSTOM

Montpellier, mars 1991.

LA G.C.E.S.

Sommaire :	Pages
1 Introduction : les mots cachent une philosophie	1
1.1 Définitions	
1.2 Evolution historique des stratégies de LAE	
1.3 Conclusions	
2 Importance des aspects socio-économiques de l'érosion	16
2.1 Importance des averses exceptionnelles	
2.2 Impact de l'érosion sur les terres de différents pays	
2.3 Conséquences sur le site érodé (on-site)	
2.4 Les nuisances en aval (conséquences off-site)	
2.5 Les éléments du choix d'une politique économique de lutte antiérosive	
Deuxième partie : Différents processus d'érosion	33
3 L'érosion mécanique sèche	35
3.1 Définition, formes, processus	
3.2 Les facteurs	
3.3 Les méthodes de lutte	
4 L'érosion en nappe	38
4.1 Formes et symptômes	
4.2 La cause et les processus d'érosion en nappe	40
4.3 Le modèle empirique USLE	45
4.4 L'érodibilité des sols	48
4.5 La topographie	52
4.6 La couverture végétale	60
4.7 Les techniques culturales	70
4.8 La lutte antiérosive	84
4.8.1 Les stratégies	
4.8.2 Les pratiques antiérosives	
4.8.3 Le facteur "Pratiques antiérosives" dans l'équation de Wischmeier	
4.8.4 Les structures antiérosives et les modes de gestion de l'eau.	
4.9 Conclusions sur les méthodes de lutte antiérosive	118
4.10 Limites de l'équation de Wischmeier et Smith	
4.11 La pratique du modèle USLE	123
5 L'érosion linéaire	126
6 L'érosion éolienne	138
7 L'érosion en masse	142
Troisième partie : Etude de cas	155
8 Diversité des stratégies de lutte antiérosive en fonction des conditions écologiques	
8.1 LAE en zone subéquatoriale : ex. Abidjan en basse Côte d'Ivoire	157
8.2 LAE en zone soudanaise de culture drainée. ex. Korhogo, pays Senoufo en nord Côte d'Ivoire	
8.3 LAE en zone soudano-sahélienne : culture pluviale sensu stricto, pays Mimianka	
8.4 LAE en zone d'agriculture sous impluvium : runoff farming, Ouahigouya du plateau Mossi, Burkina Faso	
8.5 LAE en zone sahélienne : la Mare d'Oursi	

9	Annexe	
9.1	LAE en zone de montagne surpeuplée : ex. Rwanda - Burundi	172
9.2	Le Zai, une méthode traditionnelle de restauration des sols au Burkina	194
9.3	Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale	203
9.4	La G.C.E.S., une nouvelle stratégie de LAE appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso,	214

LA GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU ET DE LA FERTILITE DES SOLS

1 - INTRODUCTION : LES MOTS CACHENT UNE PHILOSOPHIE

1.1 - DEFINITION : LE SENS DES MOTS EN FONCTION DES ACTEURS ET DE LEURS OBJECTIFS

Les problèmes de dégradation de l'environnement sont intimement liés au développement des populations et des civilisations : ils concernent autant les agronomes et forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues, que les socio-économistes. Mais tout ce monde a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même portée selon les professions.

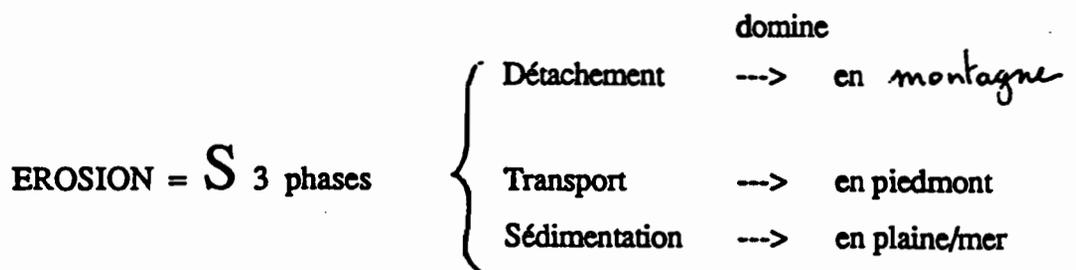
Il nous faut donc préciser le sens des mots et celui que leur prêtent les divers spécialistes qui interviennent à différentes échelles de temps et d'espace à la poursuite d'objectifs propres. C'est là une condition préalable à l'amélioration de l'efficacité des projets de lutte anti-érosive.

Erosion : vient de "*ERODERE* ", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi : les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation (ex. Grèce). En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de "denudation rate" = vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable.

La tolérance a d'abord été définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols. Mais on s'est bien vite rendu compte que la productivité des horizons humifères, riches en éléments biogènes est bien supérieure à celle des altérites, quasiment stériles. De plus, cette approche nie l'importance de l'érosion sélective des nutriments et des colloïdes qui font la fertilité des sols. On a donc tenté de définir la tolérance comme l'érosion qui ne provoquerait pas de baisse sensible de la productivité des terres. Mais là aussi, on a trouvé des obstacles majeurs. On connaît encore mal la perte de productivité des différents types de sol en fonction de l'érosion et, pour certains sols profonds sur loess des pertes en terre élevées sur les versants n'entraînent que peu de baisse de la productivité du sol mais par contre, provoquent des dégâts intolérables en aval par la pollution des eaux douces et l'envasement des barrages.

Il faut donc tenir compte à la fois de ces trois aspects : la vitesse de restauration des sols, le maintien de la productivité des terres à un niveau d'intrant égal et enfin, le respect de l'environnement au niveau de la qualité des eaux, en particulier, du ruissellement.

L'érosion résulte de nombreux processus au niveau de trois phases : le détachement de particules, le transport solide et la sédimentation. Quelle que soit l'échelle d'étude, du mètre carré au bassin versant de centaines de milliers de km², on retrouve partout ces trois phases de l'érosion mais avec des intensités différentes. D'où la diversité des acteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes (voir figure 1.1 : les acteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes de l'érosion).



Variabilité de l'érosion dans l'espace

En montagne, lorsque la couverture végétale est détruite, le ravinement et les glissements de terrain entraînent d'énormes dégâts aux réseaux de communication (internationaux) : les ingénieurs des Ponts et Chaussées ainsi que les forestiers interviennent alors pour entretenir les voies de communication, revégétaliser les parcours,

les pistes de skis, reforester les versants dénudés et corriger les torrents. Les populations rurales cherchent avant tout à gérer l'eau et les éléments fertilisants sur des prairies ou des terrasses irriguées plutôt qu'à lutter contre l'érosion (voir les Cévennes et les hauts pâturages irrigués des Alpes).

Dans les piedmonts où les pentes sont encore fortes, les dégâts d'érosion proviennent du ravinement des torrents qui charrient une énorme charge solide et pour une moindre part, de la dégradation de la végétation par le surpâturage ou les cultures de rapine. Là encore, les forestiers tenteront de résoudre les problèmes d'envasement des barrages par la RTM et la DRS (voir plus loin).

Enfin, dans les plaines, les problèmes concernent le plus souvent l'alluvionnement dans les canaux, les rivières et les ports, l'inondation des lits supérieurs des rivières, le colluvionnement boueux de quartiers résidentiels mal placés sous les versants cultivés mécaniquement sans précaution et enfin la pollution des eaux, (charge solide en suspension fine ou produits toxiques rejetés par l'agriculture ou l'industrie).

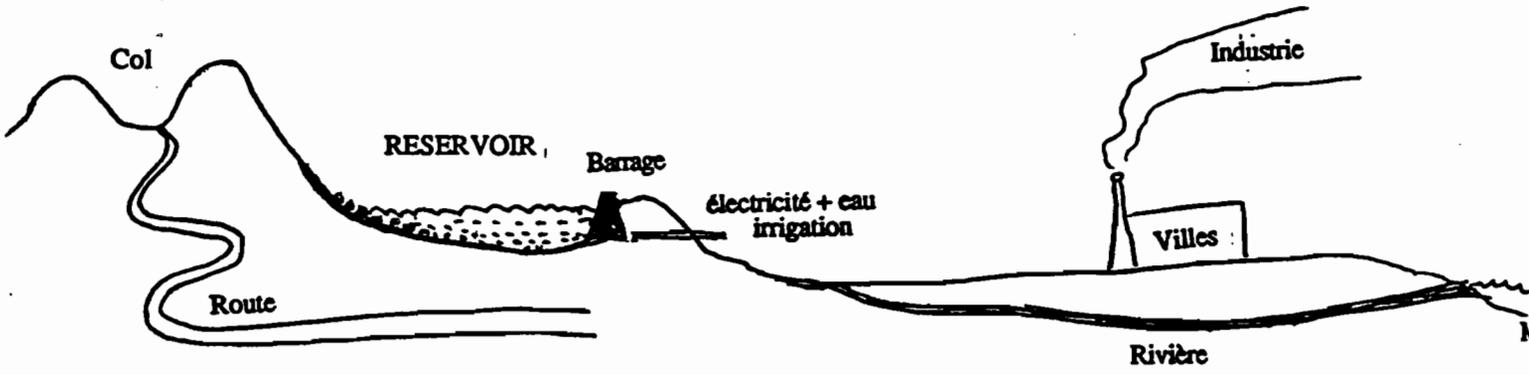
Comme l'indique la figure 1.1, les acteurs de la dégradation des sols et les agents de la lutte antiérosive diffèrent, ainsi que leurs objectifs et les stratégies qu'ils développent. Il y a donc une grande variabilité dans l'espace des types d'érosion et des acteurs de la lutte anti-érosive.

Autres aspects de la discontinuité de l'érosion dans l'espace (fig. 1.1)

Sur les parcelles paysannes et sur les versants, les agronomes, les pédologues ou les géomorphologues, parlent d'érosion ou perte en terre (sediment yield). Dans la rivière, les hydrologues ou sédimentologues parlent de transport solide (sediment delivery), transport solide en suspension, et transport de fond (sables grossiers et galets). Entre l'érosion des versants et les transports solides dans la rivière, il peut y avoir de grandes différences provenant de ce que l'on appelle le "sediment ratio", c'est à dire l'efficacité de l'érosion. En effet, au bas des pentes et dans la vallée, certains sédiments trop lourds se déposent, au moins temporairement : ils vont nourrir les sols colluviaux et alluviaux et n'atteindront la mer... ou un lac de barrage... que beaucoup plus tard. Le rapport d'efficacité de l'érosion est inférieur à 1. L'érosion diminue à mesure que le bassin versant grandit. Par exemple, Bolline (1981) a observé sur les loess du Brabant belge un détachement de particules par la battance des gouttes de pluie de l'ordre de 130 t/ha/an sous une rotation de betterave et de blé. Les pertes en terre au bas de parcelles de 25 m de long n'atteignent que 30 t/ha/an et les transports solides dans la rivière voisine, à peine 0,13 t/ha/an.

FIG. 1.1. DISCONTINUITÉ DES PROBLÈMES D'ÉROSION DANS L'ESPACE : DIVERSITÉ DES LOGIQUES

Erosion = Somme de 3 processus = Arrachement + Transport + Sédimentation
 Mais leur importance varie dans l'espace



Montagnes
Arrachements

Piémont : Erosion +
Transports/Rivières

Plaines Littoral
Sédimentation/Pollution

RTM

DRS + CES

CES

≠ lieux

≠ mots

≠ disciplines

≠ objectifs des acteurs

EROSION sur Versants
(Sediment Yield)

>

<

Transports solides dans rivières
(Sediment delivery)

Agro-Pédo-Socio

Géomorphologues

Efficacité EROSIVE
(Sediment ratio)

< 1 si colluvions

> 1 si forte Erosion des berges

Hydro-Sédimentologues

Géomorphologues

2 logiques

Logique amont / paysan

Logique aval/citadin

Objectif = productivité de la terre
= développement rural
Moyens = améliorer les systèmes de production
lutte biologique
Acteurs = Paysans + Pouvoir Villageois
Agronomes - Pédologues - Sociologues.

Objectif = protéger la qualité de l'eau
= équipement rural
Moyens = reforestation + lutte mécanique ; correction ravins
protection barrages
Acteurs - Citadins - Ingénieur
- Pouvoir Central
- Hydrologues + Sédimentologues
- Equipement + Forestier.

Par contre, en région méditerranéenne, l'énergie érosive du ruissellement est supérieure à celle des pluies. Alors, les pertes en terre sur les champs cultivés peuvent être faibles (0,1 à 5 t/ha/an : Heusch, 1973 ; Arabi et Roose, 1989) tandis que les transports solides dépassent 100 à 200 t/ha/an dans les ravines et les oueds d'après Olivry (1989) et Buffalo, (1990). Dans ce cas, plus le bassin versant est grand, plus le ruissellement est abondant et rapide, plus les débits de pointe sont importants et plus le ruissellement agresse le fond et les berges des oueds en provoquant des ravinements et des glissements de terrain. Dans ce dernier cas, le rapport d'efficacité de l'érosion est supérieur à 1 et l'érosion tend à augmenter avec la taille du bassin versant (Heusch 1973).

Variabilité de l'érosion dans le temps (fig. 1.2)

On distingue généralement l'érosion normale ou géologique qui façonne lentement les versants (érosion = 0,1 à 1 t/ha/an) (= morphogénèse) tout en permettant le développement d'une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place et des apports alluviaux et colluviaux (pédogénèse). On dit que les paysages sont stables quand il y a équilibre entre pédogénèse (vitesse d'altération des roches) et morphogénèse (érosion, dénudation) (Kilian et Bertrand, 1974).

Cependant, l'érosion géologique agit parfois de façon soudaine et catastrophique à l'occasion d'évènements rares, d'une succession d'averses qui détrempe le terrain ou encore lors des activités sismiques ou volcaniques. On se souviendra des coulées boueuses en Colombie qui, en 1988, en une seule nuit, ont rayé de la carte une ville de 25.000 habitants (Nevado RUIZ). Autre exemple d'évènement exceptionnel : dans le sud tunisien, Bourges, Pontanier et leurs collègues ont mesuré à la citerne Têlman, en moyenne, des ruissellements annuels de 14 à 25 % et des pertes en terre de 8,2 t/ha/an. Mais, le 12 décembre 1978, il est tombé une pluie centennale de 250 mm de pluie en 26 heures qui a provoqué plus de 80 % de ruissellement et 39 t/ha d'érosion en un seul jour. Ces phénomènes catastrophiques ne sont pas rares à l'échelle géologique. Flotte (1984) a décrit la coulée d'éboulis de Mechtras en Grande Kabylie (Algérie), d'environ 150 millions de m³, qui s'étend sur 18 km², 7 km de long, sur une pente de 6,8 %. Ces mouvements catastrophiques où les volumes de matériaux non triés sont importants, qui s'étendent sur plusieurs kilomètres et se sont mis en place à grande vitesse, demandent souvent des conditions climatiques différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui. Cependant, ces masses sont toujours susceptibles de se remettre en mouvement en cas de conjonction de conditions climatiques favorables (pluies exceptionnelles après gelées du sol ou émission de vapeur des volcans, ou secousses sismiques), ou en condition d'aménagement maladroit, déséquilibrant les versants.

FIG. 1.2. DISCONTINUITÉ DES PROBLÈMES D'ÉROSION DANS LE TEMPS



MORPHOGENESE
V
^
Pédogenese

Problèmes socio-économiques
population ↗ des besoins ↗
défrichements ↘ tps jachères ↘
surpâturage ↗

EROSION NORMALE = 0,1 t/h/an
Ruissellement = 1 %

E. ACCELERÉE : 10 à 500 t/ha/an
Ruissellement : 20 à 80 %

décaper 1 mètre = 100.000 ans

1 mètre en 1 siècle

E. CATASTROPHIQUE = 1 heure

RAVINES E = 100 - 300 t / ha / JOUR

Glissements E = 1000 à 10.000 t / ha / HEURE

d'où TRANSPORT Solide Rivière ↗

Sédimentation

Ex. ORAGE de Nîmes 3/10/88 : 420 mm → { 11 MORTS
4 milliards de dégâts

Conclusions { . Grande discontinuité dans le temps : { millénaire
siècle
heure
. On s'occupera de l'E. accélérée
. La presse et l'Etat ne s'occupent que des catastrophes

Contre ces deux types d'érosion géologique, il est très difficile de lutter : les moyens nécessaires sont coûteux et pas toujours efficaces. En France, Le Ministère de l'Environnement déclare l'état de catastrophe naturelle et engage les assurances à rembourser les dégâts. Le coût de ces dégâts est donc pris en charge par la communauté des imposables.

L'érosion accélérée par l'homme, suite à une exploitation imprudente du milieu est 10 à 1.000 fois plus rapide que l'érosion normale. Il suffit de perte en terre de 12 à 15 t/ha/an, soit 1 mm/an ou 1m/1.000 ans pour dépasser la vitesse de l'altération des roches (1 mètre en 20 à 100.000 ans pour altérer 1 m de granit en conditions tropicales humides selon Leneuf, 1965). La couche arable s'appauvrit en particules par érosion sélective (squelettisation du sol) et s'amincit (décapage) tandis que le ruissellement s'accélère 20 à 50 fois plus de ruissellement sous culture que sous forêt provoquant à l'aval des débits de pointe très dommageables pour l'économie (Roose, 1973).

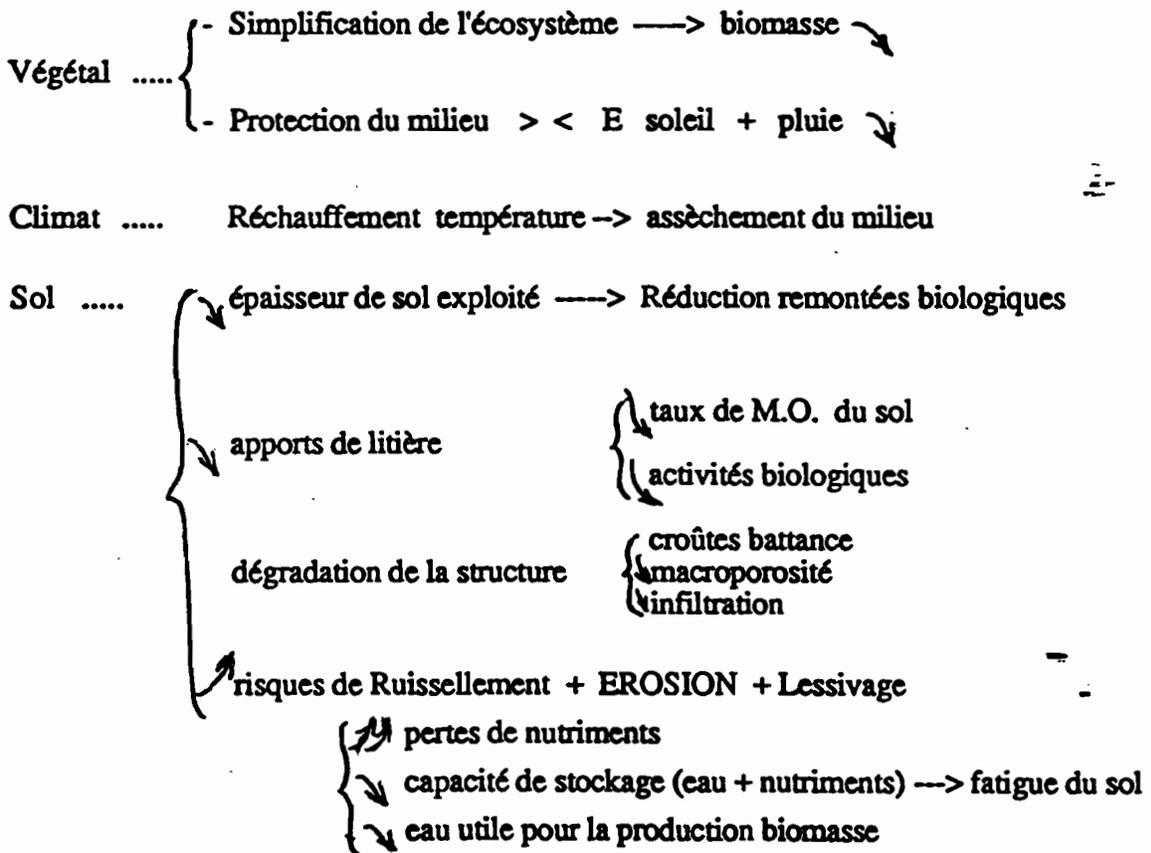
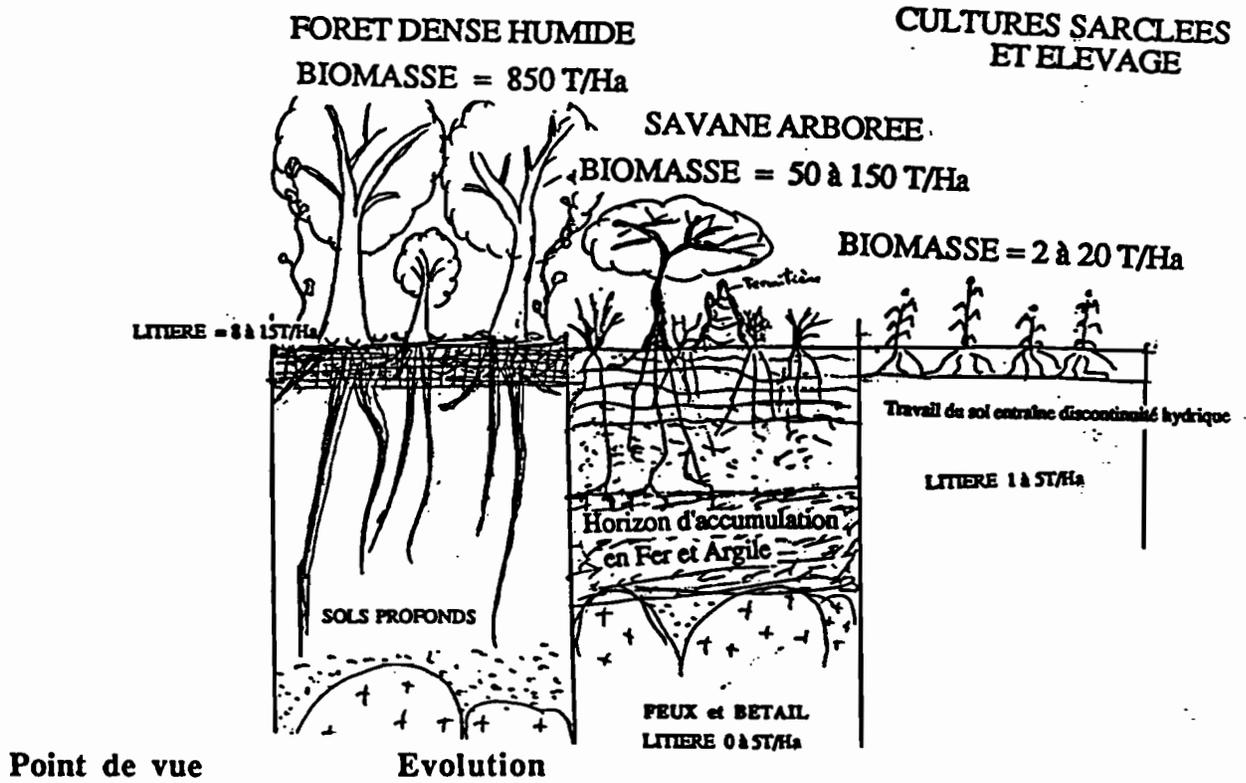
Il reste encore à définir la charge solide (c'est le poids de particules en suspension dans les eaux), la capacité d'un fluide (la masse de particules que le fluide est capable de transporter, la compétence d'un fluide, c'est le diamètre maximal des particules transportées en fonction de sa vitesse).

Alors que l'érosion comprend trois phases (arrachement, transport et sédimentation), la dégradation des terres ne concerne que l'affaissement de la structure de la macroporosité du sol sans transport de particules à longue distance. Elle provient essentiellement de deux processus :

- 1°) La minéralisation naturelle des matières organiques du sol (d'autant plus active que le climat est chaud et humide) et l'exportation minérale des cultures (non compensée par des apports de fumure) qui va entraîner la baisse de l'activité de la microfaune et de la mésofaune, responsable de la macroporosité.
- 2°) La squelettisation ou l'ensablement des horizons de surface par érosion sélective des particules fines, des matières organiques ou des nutriments, suite à la battance des pluies qui tasse le sol, cisaille les mottes, arrache au passage des particules qui vont former alentour des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation à l'origine du ruissellement.

A la figure 1.3 est schématisée la chaîne de la dégradation des terres tropicales.

FIG. 1.3. NATURE DES PROBLEMES : LE DESEQUILIBRE DU MILEU "AMENAGE"



Sous les forêts tropicales, les sols sont parfaitement protégés de l'énergie solaire et pluviale. D'une part, grâce à la canopée (850 t/ha de biomasse) qui tempère les écarts de température et d'autre part, grâce au sous-étage et en particulier à la litière (de 9 à 15 t/ha/an de matière organique qui tombe toute l'année), qui nourrit la mésosofaune et recycle rapidement les nutriments (= turn over). Les racines sont très nombreuses dans l'horizon humifère et jusqu'au contact avec la litière. Elles limitent les pertes en nutriments par drainage et par ruissellement. Une faible proportion de racines s'enfonce à grande profondeur procurant de l'eau et des nutriments aux époques où le sol superficiel est sec (= remontée biologique). Peu de ruissellement (1 à 2 %), 50 % d'évapotranspiration et autant de drainage, entraînent la formation de sols homogènes profonds, plus acides en surface qu'en profondeur. La beauté de la forêt (avec des arbres dominant à plus de 35 m de haut) peut faire illusion sur la fertilité des sols (ferrallitiques) qui la portent. En réalité, la forêt tropicale recycle perpétuellement ses résidus et récupère en profondeur les nutriments lixiviés par les eaux de drainage ou libérés par l'altération profonde des roches et des minéraux : c'est la remontée biologique.

La savane est déjà nettement moins bien tamponnée contre les variations d'énergie. La biomasse (10 à 100 t/ha) est beaucoup moins importante et la litière (2 à 8 t/ha/an) brûle au passage fréquent des feux de brousse, laissant le sol nu pour accueillir les premiers orages, brefs mais très agressifs : il en résulte un ruissellement plus abondant que sous forêt, surtout en cas de feux tardifs (Roose, 1979).

Plus le climat est chaud et sec, plus les termites remplacent les vers de terre mais le bilan de leurs activités de creusement de galeries et d'enfouissement des matières organiques à l'abri des feux est moins positif que celui des vers (Roose, 1975). Le ruissellement et l'évapotranspiration étant plus forts (à cause des croûtes de battance) et les pluies étant moins abondantes, le front d'humectation de l'eau pénètre moins profondément dans le sol et dépose des particules fines arrachées en surface et le fer, complexé aux matières organiques. Il s'agit des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Les horizons sont plus contrastés, le sol moins homogène. Les racines s'enfoncent plus régulièrement jusque dans l'horizon d'accumulation, mais beaucoup moins profondément que sous forêt.

Comment évolue la situation, dès lors qu'on défriche la forêt ou la savane pour y introduire des cultures ?

Au niveau de la végétation, on observe une simplification de l'écosystème (plus de 200 espèces d'arbres vivent à l'hectare sous forêt, moins de 25 sous savane et 2 à 4 cultures associées dans le meilleur des cas). La biomasse (1 à 8 t/ha) diminue ainsi

que l'enracinement, souvent gêné par les techniques culturales (croûtes de battance et fond de labour). La couverture du sol est réduite dans le temps (cycle de 4 à 6 mois) et protège mal la surface du sol contre les rayons du soleil (les températures extrêmes augmentent) et contre la battance des pluies (formation de croûtes de battance et d'un fort ruissellement).

Au niveau du sol, le climat est plus chaud, plus sec, moins tamponné :

- la litière est très réduite sauf en cas de plantes de couverture
- le taux de matières organiques et l'activité de la microflore et de la mésofaune diminue,
- la macroporosité s'effondre au bout de quelques années, la capacité d'infiltration diminue,
- le sol devient plus compact et accuse les discontinuités spatiales : pellicule de battance et fond de labour.

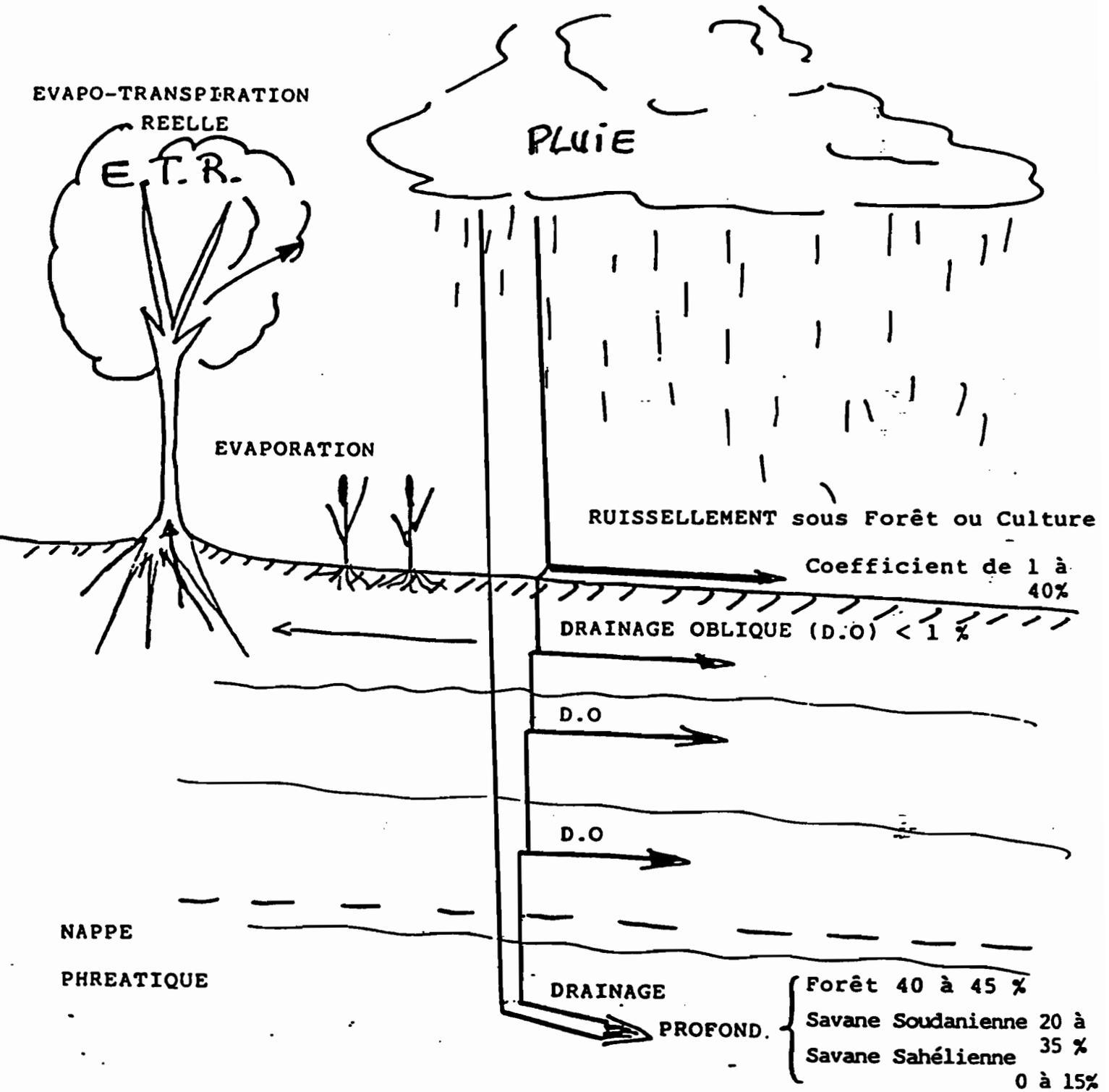
On comprend dès lors que la mise en culture sur des friches soit une véritable catastrophe qui remet en cause l'équilibre du système sol. Les fuites d'éléments nutritifs s'accroissent, les apports compensatoires diminuent, la fertilité physique et chimique de la terre s'effondre après quelques années de culture intensive (voir l'échec de la culture intensive de l'arachide par la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux, C.G.O.T. en Casamance vers les années 50).

Le ruissellement et l'érosion apparaissent alors clairement comme un signal d'alarme: le système d'exploitation n'est pas en équilibre avec le milieu. Il va falloir restaurer la fertilité des sols, soit par une longue jachère forestière (20 à 30 ans) soit par des interventions vigoureuses pour rétablir la macroporosité (travail du sol), la matière organique, la biomasse nécessaire pour la vivifier (fumier ou compost), les amendements indispensables pour renforcer la structure et améliorer le PH. En réalité, il faut encore inventer des systèmes de défrichement progressifs et des systèmes de production intensifs durables et équilibrés plus productifs que les systèmes traditionnels actuellement en place.

Il faut enfin définir les différents termes du bilan hydrique (voir figure 1.4).

Le ruissellement superficiel est l'excès de pluie qui n'arrive pas à s'infiltrer dans le sol, roule à sa surface, s'organise en filets et rejoint rapidement la rivière où il provoque des débits de crues élevés (temps de réponse de l'ordre d'une demi-heure).

FIG 1.14 BILAN HYDRIQUE



PLUIE = RUISS. + DRAIN. + E.T.R. ± VAR. STOCK

- MESURE DES FLUX (PLUIE - RUISS. - DRAIN. - VAR. PROFILS HYDRIQUES)
- ESTIMATION DRAIN. EN ANNEE NORMALE ET DECENNALE SECHE OU HUMIDE.

Le ruissellement hypodermique (interflow) est déjà plus lent car il chemine dans les horizons superficiels du sol souvent beaucoup plus poreux que les horizons minéraux profonds (temps de réponse de quelques heures).

Enfin, les nappes temporaires ou phréatiques, c'est à dire pérennes, entretiennent le débit de base des rivières grâce à un écoulement beaucoup plus lent : temps de réponse de plusieurs jours.

En conclusion, l'érosion est un ensemble de processus variable dans le temps et dans l'espace, en fonction des conditions écologiques et des mauvaises conditions de gestion de la terre par l'homme. La lutte anti-érosive intéresse divers acteurs dont les intérêts ne sont pas forcément compatibles. Il va donc falloir définir clairement les objectifs prioritaires des projets de lutte anti-érosive et choisir pour chaque situation, les méthodes les plus efficaces, soit pour conserver ou pour restaurer la fertilité et la productivité des terres paysannes, soit pour gérer les sédiments et améliorer la qualité des eaux qui intéressent particulièrement les citoyens.

1.2 - EVOLUTION HISTORIQUE DES STRATEGIES DE LUTTE ANTI-EROSIVE

L'érosion est un vieux problème ! Dès que les terres émergent de l'océan, elles sont attaquées par l'énergie du vent, des vagues et du flux. L'homme s'est donc entraîné à en réduire les effets. Le développement de la production rurale entraîne une augmentation des risques de dégradation des terres :

- soit par extension des surfaces à des terres neuves qui s'avèrent plus fragiles qu'on ne le pensait au bout de quelques années,
- soit par intensification de l'usage des intrants :
 - * la fertilisation minérale intensive peut entraîner l'acidification des sols et la pollution des eaux,
 - * l'irrigation diminue la stabilité de la structure ou entraîne la salinisation (en milieu aride),
 - * la mécanisation, et surtout la motorisation, entraînent l'accélération de la minéralisation des matières organiques du sol, la dégradation de la structure, la compaction des horizons profonds et l'accentuation des discontinuités hydrauliques (chute brutale de la capacité d'infiltration au fond du labour, même en l'absence de semelle).

La dégradation des sols par érosion, acidification ou salinisation est probablement l'une des multiples causes qui ont entraîné la décadence des civilisations anciennes dès que la concentration des populations dans les villes entraîne une pression économique trop forte sur la productivité des campagnes. La jachère disparaît, les sols se dégradent à plus ou moins court terme car rien ne compense les exportations par les récoltes et les pertes, par érosion ou drainage.

Déjà en 1944, le géographe Harroy avait bien compris pourquoi "l'Afrique est une terre qui meurt". Elle meurt sous l'influence des méthodes déséquilibrantes des systèmes coloniaux. Il proposait une politique en trois points :

- la protection intégrale des parcs nationaux pour protéger les écosystèmes naturels,
- les travaux anti-érosifs du type des banquettes de DRS ou des fossés aveugles,
- des recherches sur les techniques culturales et les systèmes de production équilibrée associant l'élevage, la forêt et l'agriculture.

L'érosion accélérée et le ruissellement excessif sont liés à un certain mode de développement déséquilibrant le paysage : défrichement de zones fragiles, dénudation et tassement par le surpâturage, épuisement du sol par les cultures intensives non compensé par les apports de matières organiques et de nutriments. Si c'est bien l'homme qui augmente les risques d'érosion par des techniques d'exploitation maladroites, alors on peut espérer renverser le sens actuel de l'évolution, en améliorant l'infiltration pour produire plus de biomasse, en augmentant la couverture végétale du sol pour restituer plus de résidus organiques au sol et par là, réduire le ruissellement et l'érosion.

Certains auteurs prétendent que l'érosion est fonction de la densité de la population. Il est vrai que dans un système agraire donné, si la population dépasse certain seuil, le sol vient à manquer et les mécanismes de restauration des sols se grippent. Ainsi, en zone soudano-sahélienne, dès que la population dépasse 20 à 40 hab/km², le temps de jachère diminue et devient inefficace : on parle d'une zone dense dégradée dès que la population atteint une centaine d'habitants par km². Les adultes sont alors obligés de migrer en saison sèche pour trouver un complément de ressources pour assurer la subsistance de leur famille.

Curieusement, dans d'autres zones tropicales plus humides, à deux saisons culturales ou sur des sols plus riches, volcaniques, par exemple, comme à Java, on ne parle de forte densité qu'au-delà de 250 à 750 hab/km². Les cas du Rwanda et du

Burundi sont flagrants ; malgré des sols très acides et des pentes dépassant 30 à 80 %, les familles se débrouillent mieux qu'au Sahel avec un seul ha à condition d'intensifier le système de production, d'associer des cultures, d'introduire des arbres et de gérer les animaux en stabulation, de recycler rapidement tous les résidus et d'arrêter l'hémorragie de nutriments par érosion et drainage.

On peut donc penser que le milieu se dégrade avec la densité de population jusqu'à atteindre certains seuils au-delà desquels les paysans se sentent obligés de changer de système de production. C'est le cas des zones soudano-sahéliennes sous l'impact de la longue sécheresse de ces quinze dernières années (la population n'augmente presque plus à cause de l'émigration). Les paysans du Yatenga acceptent d'investir 30 à 100 jours par an pour installer des structures anti-érosives qui leur permettent de mieux gérer l'eau et la fertilité de leurs parcelles : cordons de pierres, mares, lignes d'arbres ou bandes enherbées, reconstitution des parcours et des parcs arborés sur des blocs cultivés (Roose, Rodriguez, 1990).

1.2.1 - Les stratégies traditionnelles de lutte anti-érosive

Depuis 7.000 ans, l'homme a accumulé les traces de sa lutte contre l'érosion, la dégradation des sols et le ruissellement, en vue d'améliorer la gestion de l'eau et la fertilité des sols. On constate que les méthodes traditionnelles sont strictement liées aux conditions socio-économiques.

- a) La culture itinérante (shifting cultivation) est la plus vieille stratégie utilisée sur tous les continents à une époque où la population est peu dense (20 à 40 habitants/km² en fonction de la richesse du sol et de l'humidité du climat). Après défrichage, on cultive sur les cendres et on abandonne la terre dès qu'elle ne rend plus assez pour le travail fourni. Pour que le système reste équilibré il faut une réserve de terre considérable. Si la pression démographique augmente, le temps de jachère diminue et le sol se dégrade progressivement. Ces stratégies peuvent être bien adaptées dans les zones peu peuplées, sur les sols profonds recevant plus de 600 mm de pluie par an.
- b) A l'opposé, des gradins en courbe de niveaux (bench terracing) ou des terrasses méditerranéennes irriguées apparaissent, dès lors que la population est dense, que la terre est rare (sauf en montagne) et que le travail manuel est bon marché.

Ces stratégies, qui demandent 500 à 800 h/j d'investissement pour construire des structures, puis un immense effort pour restaurer la fertilité des sols, ne sont acceptées par les paysans que dans les cas où elles peuvent produire des cultures extrêmement rentables ou encore dans le cas où il faut résister à l'envahisseur qui rentre par les plaines. C'est le cas des Dogons au Mali ou des Kirdis du Nord Cameroun, résistant à l'emprise de l'Islam ou encore des terrasses bâties par les Incas au Pérou, dans la région de Machu Pichu pour éviter les Espagnols.

- c) **Les billons, les cultures associées et l'agroforesterie.** Dans les zones forestières humides et volcaniques du Sud-Ouest du Cameroun, les Bamileke ont réussi à assurer un équilibre raisonnable du milieu malgré une forte population (150 à 300 hab/km²) en combinant les cultures associées couvrant toute l'année de gros billons, à divers systèmes agro-forestiers.
- d) **Les alignements de pierres, murettes et fumure organique.** Comme bien d'autres ethnies, les Dogons du Mali se sont jadis retranchés dans les falaises gréseuses de Bandiagara pour résister à l'influence musulmane. Pour survivre, ils ont dû développer toute une série de méthodes conservatoires :
- petits champs entourés de blocs de grès piégeant le sable en saison sèche et le ruissellement lors des pluies,
 - murettes de pierres et remontée de terre sableuse depuis la plaine pour créer des sols sur les dalles gréseuses servant d'impluvium,
 - structures en nid d'abeille servant d'unité de production pour des oignons irrigués à l'aide de calebasses,
 - paillage et compostage des résidus de culture, des déchets familiaux et déjections animales.
- e) **Les bocages : association étroite entre les cultures, l'élevage et l'arboriculture.** L'Europe a déjà connu plusieurs crises d'érosion. La plus connue se situe au moyen-âge, lorsque sous la pression démographique, il fallut abandonner la jachère naturelle. Le travail du sol et l'enfouissement du fumier furent introduits pour restaurer plus vite la fertilité chimique et physique des sols. On a associé l'élevage à la culture et on a cloisonné les paysages par une succession de bosquets, de petits champs et de prairies clôturées par des haies vives. On peut se demander si ce n'est pas vers ce type de solution qu'il faudrait tendre dans la frange soudano-sahélienne.

Mais actuellement, la mécanisation et l'industrialisation de l'agriculture, ainsi que la crise économique imposent une remise en cause de ces aménagements. Une nouvelle crise d'érosion se développe et il faut trouver de nouvelles stratégies de conservation des sols.

I.2.2 Des stratégies modernes d'équipement rural

Plus récemment, se sont développées diverses stratégies modernes de lutte antiérosive.

- 1° **La RTM.** La restauration des terrains en montagne s'est développée en France à partir de 1850, puis dans les montagnes d'Europe où, pour protéger les plaines fertiles et les voies de communications, les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué la couverture végétale et pédologique et corrigé les torrents par des techniques de génie civil et biologique (Lilin, 1986).

- 2° **La CES.** La conservation de l'eau et des sols cultivés a été organisée aux USA d'Amérique depuis 1930. L'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes comme le coton, l'arachide, le tabac ou le maïs dans la Grande Plaine, a déclenché une érosion catastrophique par le vent et par l'eau. En 1930, 20 % des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous l'impulsion de Bennet (1939) s'est constitué un service de conservation de l'eau et des sols, présent dans chaque canton, pour conseiller et aider les fermiers qui demandent un appui technique et financier ; les services centraux effectuent les études et les projets.

Deux écoles s'affrontent encore aujourd'hui :

- L'une, à la suite de Bennet observe que c'est le ravinement qui provoque les transports solides les plus spectaculaires : or, le ravinement provient de l'énergie du ruissellement qui est fonction de sa masse et de sa vitesse au carré ($E. Ruiss. = 1/2 MV^2$). La lutte antiérosive s'organise donc autour des moyens de réduction de la vitesse du ruissellement et de sa force érosive (banquette de diversion, seuils et exutoires enherbés) sans réduire la masse de ruissellement aux champs.

- L'autre école, à la suite des travaux de Ellison (1944) sur les processus de battance des gouttes de pluie et des équipes de Wischmeier (1960), rappelle que le ruissellement se développe après la dégradation de la structure de la surface du sol par l'énergie des gouttes de pluie. La lutte antiérosive s'organise cette fois sur les champs autour du couvert végétal, des techniques culturales et d'un minimum de structures dans le paysage.

3° La DRS. La défense et restauration des sols s'est développée en Algérie, puis autour du bassin méditerranéen vers les années 1940-60, pour faire face à de graves problèmes de sédimentation dans les retenues artificielles et de dégradation des routes et des terres. Il s'agissait avant tout de mettre en défense les terres dégradées par le surpâturage et le défrichement et de restaurer leur potentiel d'infiltration par l'arbre, considéré comme le moyen le plus sûr d'améliorer le sol. D'énormes moyens mécaniques ont été mis en oeuvre pour capter le ruissellement en nappe dans les terres cultivées (diverses banquettes, levées de Monjauze, etc...) pour reforester les terres dégradées et pour structurer des zones d'agriculture intensive (Plantie, 1961 ; Putod, 1960 ; Monjauze, 1964 ; Greco, 1978).

1.2.3 - La G.C.E.S. = une stratégie fondée sur le développement rural

Depuis 1975-80, de nombreuses critiques de chercheurs, de socio-économistes et d'agronomes se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches d'équipement menées trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (Lovejoy, Napier, 1986).

Aux USA, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de CES, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an, limite de tolérance sur les sols profonds.

Au Maghreb et en Afrique de l'Ouest, les paysans préfèrent souvent abandonner les terres aménagées par l'Etat plutôt que d'entretenir des moyens de production dont ils ignorent l'objectif (et la propriété) - (Heusch, 1986).

Les raisons évoquées des échecs partiels sont multiples (Marchal, 1979 ; Lefay, 1986, REIJ et al, 1986) :

- choix de techniques peu adaptées au sol, au climat, à la pente ;

- mauvaise planification ou réalisation peu soignée ou absence de suivi et d'entretien;
- absence de préparation des bénéficiaires et rejet du projet à cause d'une perte de surface non compensée par l'augmentation des rendements ;
- désorganisation des unités de production (parcelles morcelées et isolées).

Devant ces échecs, il fallait développer une nouvelle stratégie qui prenne mieux en compte les besoins des gestionnaires des terres, tant paysans qu'éleveurs, en proposant des méthodes qui améliorent à la fois la capacité d'infiltration du sol et les rendements ou la marge bénéficiaire des paysans (Roose 1987). Cette méthode a été appelée "Land Husbandry" par Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer en 1988, "La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols" par Roose (1987).

Elle prend pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et comporte 4 phases :

- 1°) Des dialogues préparatoires entre paysans, chercheurs et services techniques. Cette phase comprend deux enquêtes pour localiser les problèmes, évaluer leur importance, leurs causes et les facteurs sur lesquels on va pouvoir jouer pour réduire le ruissellement et l'érosion. Elle comporte aussi des "tours de champs" avec la communauté villageoise active pour développer leur sens de la responsabilité communautaire et découvrir la façon dont ils ressentent les problèmes de dégradation et les stratégies qu'ils mettent déjà en oeuvre pour améliorer l'usage de l'eau, entretenir la fertilité des sols, renouveler la couverture végétale et maîtriser la divagation du bétail.
- 2°) La deuxième phase met en place des expérimentations sur les champs des paysans pour quantifier et comparer les risques de ruissellement ou d'érosion et les gains de rendement sous différents types de mise en valeur ou de technique culturale. Il s'agit de vérifier la faisabilité, la rentabilité et l'efficacité des méthodes anti-érosives préconisées.
- 3°) *Evaluation par les paysans et les techniciens de la faisabilité/rentabilité/efficacité*
- 4°) Enfin, un plan d'aménagement global doit être défini après 3 à 5 ans de dialogue pour intensifier rationnellement l'exploitation des terres productives, pour structurer le paysage et pour fixer les ravines en privilégiant les méthodes biologiques simples, maîtrisables par les paysans eux-mêmes. Rien ne peut se faire sans l'accord préalable des paysans amenés à gérer l'ensemble de leur terroir.

1.3 - CONCLUSIONS DU CHAPITRE

- 1°) Pendant longtemps, le développement rural a été une somme de projets sectoriels et l'on a observé un développement rural à vitesse variable, aboutissant généralement au déséquilibre du milieu physique et de la société humaine.**
- 2°) Dans les pays tropicaux il faut valoriser l'eau, donc penser à améliorer l'infiltration et la couverture des terres en production. Il ne faut pas attendre que l'ensemble du terroir soit dégradé pour proposer la D.R.S., la mise en défense d'une partie du terroir et la restauration des sols, mais proposer une gestion conservatoire de l'eau et des sols valables, en vue d'un développement réel et durable.**
- 3°) Le développement rural exige un changement de mentalité et cela prend du temps.**

2 - IMPORTANCE DES ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES DE L'ÉROSION

2.1 - INFLUENCES RESPECTIVES DES ÉVÉNEMENTS EXCEPTIONNELS ET DES AVERSES COURANTES SUR L'ÉROSION

Quand la Presse parle d'érosion, il s'agit le plus souvent de catastrophes naturelles, d'événements exceptionnels, qui ont entraîné en quelques jours, voire en quelques minutes, des dégâts exceptionnels et la perte de vies humaines. Bien souvent, l'homme n'est pas le responsable de ces catastrophes mais ce sont des forces naturelles qui en sont à l'origine, forces qu'il ne domine pas. Par exemple : des éruptions volcaniques, des secousses sismiques, des pluies torrentielles tombant sur des sols gelés. Cependant, par ses aménagements imprudents, il peut augmenter les dégâts. Oubliant la sagesse de ses ancêtres, il a installé ses ouvrages ou même sa demeure, sur la trajectoire des avalanches, des coulées boueuses ou près des failles géologiques (exemple : San Francisco), dans le lit majeur des rivières ou sur toute autre surface que les inondations couvrent de temps en temps. L'homme peut donc augmenter les conséquences désastreuses de ces événements catastrophiques.

Les récentes inondations de Nîmes en sont un bon exemple (Davy, 1989). Le 3 octobre 1988, un orage violent déversa 420 mm de pluie en 6 heures sur deux petits bassins versants méditerranéens qui dominent la ville. Les torrents et les sources sortant du massif calcaire gonflèrent démesurément et envahirent brutalement la vieille ville en emportant tout sur leur passage : les véhicules et le contenu des magasins. Les passages existents qui sont capables d'évacuer ces énormes quantités d'eau. Ces passages ont été respectés jadis par les Romains mais récemment, ils ont été barrés par des immeubles, par la R. N. 113, laquelle est prévue pour être inondable et ne pose pas de problème, par la digue sur laquelle est situé le chemin de fer qui a été emporté sur 20 m, le drainage étant barré par les épaves de voitures et enfin par l'autoroute, légèrement surélevée. Il s'en est suivi une vaste zone inondée, 4 milliards de dégâts et onze morts.

La question est de savoir si l'essentiel des dégâts causés par l'érosion provient de ces catastrophes très médiatiques, mais sporadiques, lesquelles sont bien difficiles à arrêter, ou si l'essentiel de l'érosion est provoquée par la somme de l'énergie des pluies tombant sur les sols cultivés susceptibles d'être aménagés. Une étude détaillée des dégâts d'érosion dans le vignoble alsacien (Schwing, 1979) a montré que le coût annuel des remontées de terre et des pertes d'intrants, à la suite des orages habituels, s'élève à

environ 2.000 F/ha/an tandis que le coût supplémentaire dû aux événements exceptionnels revient à 15.000 F/ha tous les 25 ans plus les dépenses des collectivités locales.

S'il est bien connu que les pluies exceptionnelles entraînent généralement de gros dégâts, l'importance relative de celles-ci est variable selon les milieux. En milieu tempéré, d'après Wischmeier, c'est la somme de l'érosivité de toutes les pluies significatives (supérieures à 12,5 mm) qui détermine le niveau de l'érosion annuel à l'échelle des versants. En région sub-équatoriale, il semble qu'il en soit de même (Roose 1973). Par contre, en zone semi-aride, sahélo-saharienne ou méditerranéenne, il peut ne rien se passer pendant des années, puis brutalement, à l'occasion d'une averse ou d'une série d'averses exceptionnelles, l'allure du paysage est modifiée en quelques heures pour des années, voire des siècles : ravines profondes, glissements de terrain, sapements de berges des oueds, sédimentations imposantes dans les plaines inondées. (voir les événements en Tunisie en 1969 : Claude et col. 1970). C'est ainsi qu'il n'est pas toujours facile de distinguer les ravines actuellement fonctionnelles, des formes héritées de l'histoire. Il n'y a donc pas toujours de lien direct entre les formes de l'érosion et le système d'exploitation du terrain qui l'entoure.

Autre problème économique important : les aménagements anti-érosifs sont-ils aussi efficaces pour les averses de fréquence rare que pour les averses ordinaires ?

Les hydrologues prétendent qu'au niveau des grands bassins versants, les aménagements ne sont efficaces que pour des averses petites et moyennes. Pour les averses très abondantes, de fréquence inférieure à une sur 25 ans, le sol serait tellement engorgé que, quel que soit l'état de la surface des sols, le couvert végétal et les structures anti-érosives, le ruissellement se développerait rapidement et provoquerait des débits de pointe élevés et des transports solides impressionnants. Pour lutter contre ces problèmes il faudrait chercher d'autres méthodes de lutte pour résoudre ces manifestations catastrophiques.

Le problème s'est posé pour l'aménagement de la cuvette de Tananarive sur les plateaux malgaches. Comme cette cuvette reçoit cinq rivières et ne connaît qu'un petit exutoire, elle est régulièrement inondée lors des tornades qui proviennent de l'Océan Indien. Ces inondations sont d'autant plus dommageables qu'elles détruisent les récoltes de riz et délogent parfois plus de 100.000 habitants venus chercher abri près de la capitale.

Trois solutions ont été étudiées. D'abord, agrandir et approfondir l'exutoire en faisant sauter la barre rocheuse, mais l'érosion régressive risque alors de détruire la rizière qui nourrit la capitale.

On peut aussi supprimer une partie du bassin versant en construisant des barrages conçus pour stocker le ruissellement seulement lors des plus fortes averses. C'est une formule élégante mais coûteuse en devises étrangères car cette technologie doit être importée.

Enfin, on peut aussi aménager les collines, planter des forêts, renforcer les structures anti-érosives (tanette = terrasse à talus enherbé) et améliorer les techniques culturales). Cette solution s'étale dans le temps mais elle est à la portée financière d'un pays pauvre fortement encadré politiquement.

Les seuls résultats expérimentaux disponibles (4 bassins versants de 4 ha à MANANKA = 0 et sur les hauts plateaux malgaches) montrent que les débits de pointe du bassin régional témoin (savane à *Loudetia stipoides* brûlée) sont dix fois plus forts que sous jeunes forêts de pins (*Pinus patula*) et 4 fois plus forts que sur bassins cultivés, aménagés en terrasses progressives. Pour les averses rares, les débits de pointe se confondent en effet mais seulement pour des averses de fréquence 1 sur 500 ans sous forêts et 1 fois tous les 100 ans sous cultures. Bien qu'efficace à long terme, la méthode n'a pas été développée à grande échelle car son action est trop différée dans le temps (plus de 10 ans) pour que la forêt soit efficace sur le ruissellement.

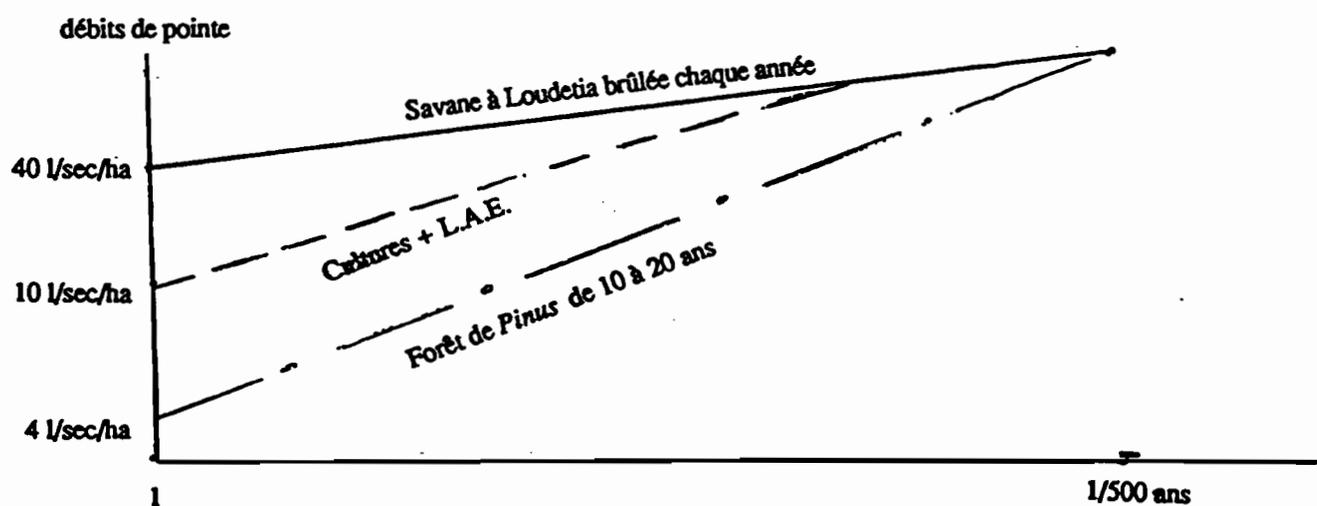


Fig. 2.1 : Evolution des débits de pointe en fonction de la fréquence des pluies. Effets des techniques antiérosives.

2.2 - IMPACT DE L'ÉROSION SUR LES TERRES DE DIFFÉRENTS PAYS

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre.

Kanwar (1982), au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi a montré que sur 13.500 millions d'hectares de surface exondés à la surface de la terre, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, la salinisation ou l'urbanisation. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables. L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde.

Aux U.S.A., vers 1930, 20 % des terres cultivables sont gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons Européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dust bowl", nuages de poussières qui assombrissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes très impressionnants ont déterminé l'opinion publique puis le Gouvernement, à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherches a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre connue sous le nom de U.S.L.E. (Wischmeier et Smith, 1958, 1978). En 1986, Lovejoy & Napier ont fait remarquer qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

En France, Gobillot & Hénin (1956) lancèrent une enquête qui permit d'estimer que 4 millions ha de terres cultivées étaient dégradées par l'érosion hydrique ou éolienne. Le danger étant considéré comme limité, les crédits de recherche dans ce domaine le furent aussi. Aussi, la France ne dispose-t-elle toujours pas de référentiel de lutte anti-érosive, ce qui pose bien des problèmes dans le cas des études d'impact.

Des chiffres bien plus dramatiques encore donnèrent l'alarme dans les pays tropicaux. Combeau, dans son cours en 1977, rapporte que 4/5 des terres de Madagascar sont soumises à l'érosion accélérée, tandis que 45 % de la surface de l'Algérie sont affectés par l'érosion. L'Algérie perdrait 100 ha de terre arable par jour de pluie ! Le

Fleuve Jaune, en Chine, charrie chaque année des masses considérables de terre qui correspondraient à la surface de la Belgique sur 1m d'épaisseur ! (33.000 km²). Il est vrai que la région des loess, en Chine, pose des problèmes énormes.

Plus sérieux sont les résultats des mesures de pertes en terre sur parcelle (100 m²) mises en place sous l'impulsion du Professeur Frédéric Fournier depuis les années 1950, par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD (Roose 1968, 1973 et 1980). Ces pertes en terre varient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 600 tonnes en montagne, sur des pentes de 30 à 60 %) sous des cultures propres aux régions forestières à pentes moyennes (4 à 25 %), des pertes en terre de 0,5 à 20 t/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes.

Si on accepte une densité apparente des horizons de surface variant de 1.2 à 1.5, les ablations correspondantes par érosion varient de 0,1 à 7 et même 15 mm en montagne, en fonction de la topographie, du climat et des cultures. Ceci correspond à 1 à 70 cm (150) cm/siècle ou 0,2 à 14 mètres depuis le début de l'ère chrétienne.

Bien évidemment, les mêmes sols ne sont pas restés sous cultures depuis 2.000 ans ! Épuisés après 2 à 15 ans de culture plus ou moins intensives et déséquilibrées (les exportations et les pertes ne sont pas compensées par les restitutions et les apports), les terres ont été abandonnées à la jachère dont le premier effet est de réduire l'érosion.

La durée de vie des sols peut aussi être estimée à partir des pertes en terre annuelles moyennes, de l'épaisseur du sol explorable par les racines, et de la vitesse de la régénération de la fertilité du sol et de la courbe de rendement du sol en fonction de l'épaisseur de la couche arable (Stocking & Biot, 1987). En milieu forestier, où les pluies sont agressives et les pentes fortes, les pertes en terre peuvent être importantes et la dégradation des terres est très rapide (quelques années). Cependant, la régénération des sols y est également rapide, car un sol dégradé est rapidement envahi par la végétation.

En milieu semi-aride, la durée de vie peut atteindre quelques dizaines d'années, malgré la modestie des pentes faibles et de l'agressivité des pluies, mais la restauration de la fertilité des sols est d'autant plus lente que la production de biomasse est faible en zone aride et que les sols sont profondément épuisés.

L'analyse des transports solides de centaines de rivières américaines et européennes, montre qu'il existe une zone climatique semi-aride (pluies annuelles moyennes variant de 350 à 700 mm, en fonction de la continentalité des bassins) où la dégradation spécifique des bassins est maximale. En zone plus aride, le transport solide diminue avec l'énergie des pluies.

En zone plus humide, le couvert végétal intercepte une part importante de l'énergie des pluies et du ruissellement (Fournier, 1955). Ce qui est vrai statistiquement sur un grand échantillon de bassins versants, ne l'est plus à l'échelle du terroir et encore moins à l'échelle de la parcelle. Le mode de gestion particulier de chaque parcelle, entraîne des différences locales très importantes et c'est ce qui justifie la mise au point de techniques culturales de lutte anti-érosive.

2.3 - CONSEQUENCES SUR LE SITE ERODE (ON SITE)

L'impact économique de l'érosion peut être analysé à deux niveaux :

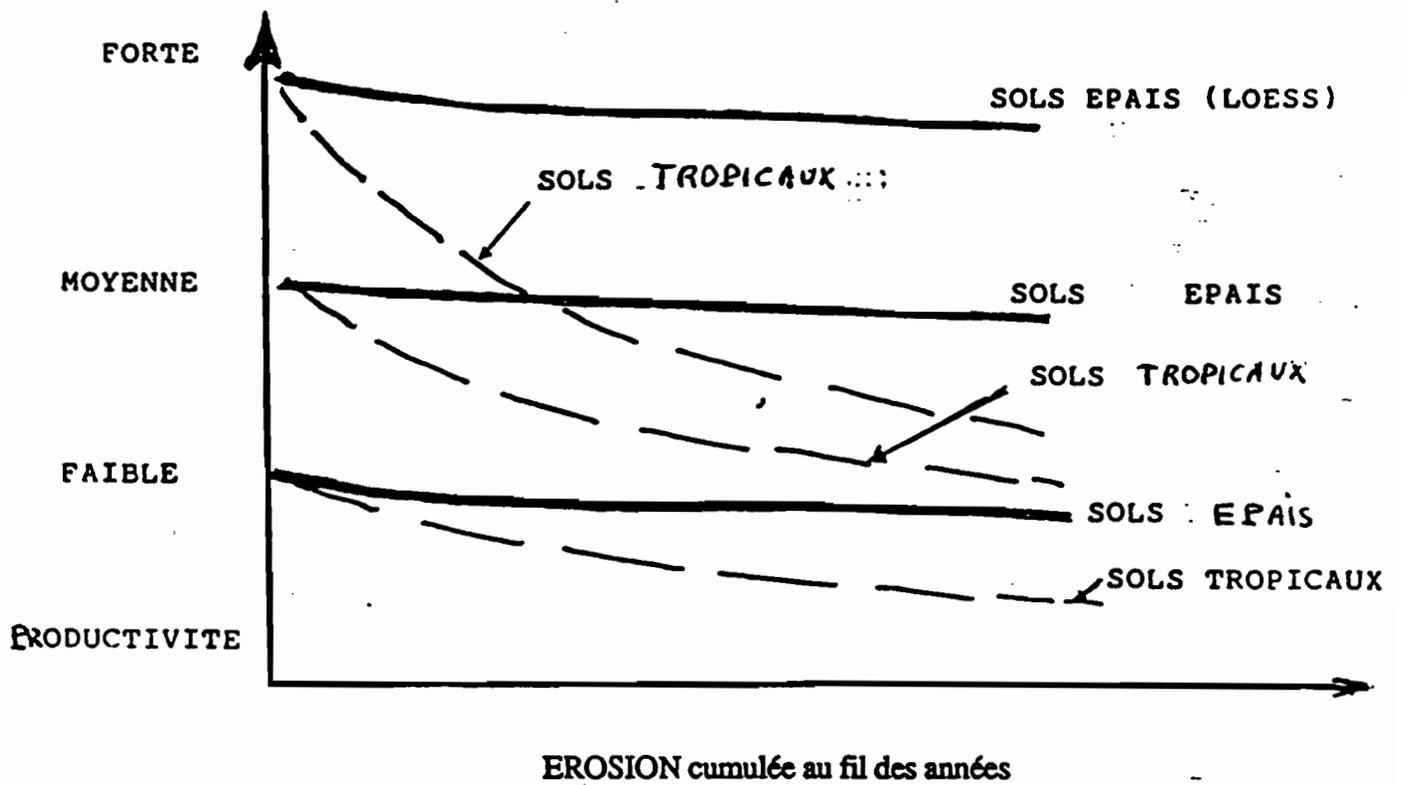
- d'une part, sur les parcelles où se sont développées les manifestations du ruissellement et de l'érosion (on site) ;
- d'autre part, à l'aval de ces parcelles originales (nuisance, off-site).

Le coût économique de l'érosion, sur le site même de l'érosion, peut s'exprimer en fonction de différents aspects.

2.3.1 Pertes de surfaces productives durant une saison et les inconvénients pour la mise en valeur.

Prenons l'exemple de la plantation d'ananas de la Salci à Ono, en Basse-Côte d'Ivoire. Le défrichement, puis le traitement motorisé d'une plantation industrielle de 1.000 ha a très vite posé des problèmes d'érosion qui furent jugulés par l'installation de pistes d'exploitation en courbes de niveau, de talus enherbés et l'alternance de bandes cultivées d'ananas d'âges différents et de pouvoir couvrant différent : il faut 6 mois pour que l'ananas couvre plus de 90 % du sol et le protège contre l'érosion. Mais, vers 1973, l'importation de Hawaï de nouvelles techniques de culture motorisée à partir d'une citerne avec un bras distributeur d'engrais, herbicides, nématicides, de 17 m de long, a nécessité la réadaptation de la plantation, suppression des talus et des chemins isohypses pour installer des bandes cultivées de 34 m de large, suivant plus ou moins les courbes de niveaux. Aussitôt, l'érosion ravinante s'est manifestée, interdisant le passage des gros engins sur des secteurs entiers retournant à la culture manuelle (peu rentable). L'estimation des surfaces perdues par érosion (ravines, déracinement de plants, enfouissement de plantes sous une couche de sable stérile, etc...) aboutit à un chiffre très supportable - à peine 2 % de perte de surface productive mais la zone touchée, abandonnée par la motorisation est beaucoup plus importante, (70 ha rien que pour une

FIG. 2.2 : INFLUENCE DE L'EROSION SUR LA PRODUCTIVITE DE DIFFERENTS SOLS

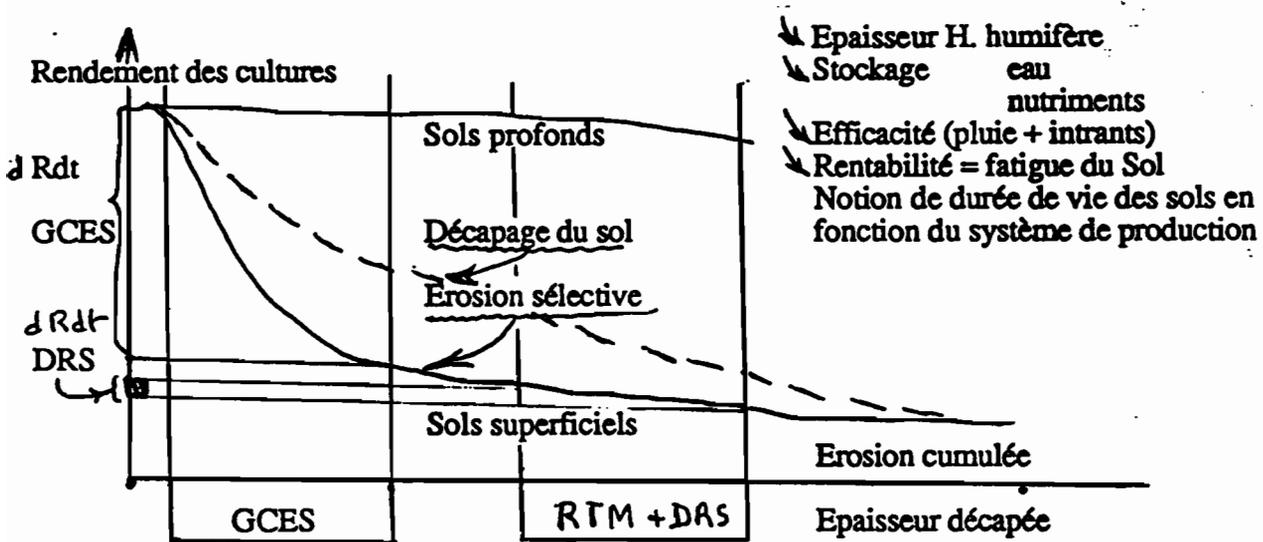


d'après DREGNE (H.E.), 1988

FIG. 2.3 : CONSEQUENCES ECONOMIQUES

I. Pertes sur les lieux érodés (ON Site)

- perte d'eau et d'engrais + pesticides
- perte de production immédiate au niveau
 - regional : 2-10 % = Compensation
 - local ↗ 50 % = catastrophes individuelles
- perte de surface cultivable au niveau
 - mondial ... 7 à 10 millions d'ha/an
 - region 2-5 %
 - parcelles ... ↗ 20 à 100 %
 - il faut 3 siècles pour détruire toutes les terres cultivées
- perte de productivité à long terme Mémoire sol



Conséquences majeures pour la lutte A.E.

- 1 LAE
 - sur sols profonds → seulement effet sur nuisance aval
 - sur sols superficiels → effet sur rendement beaucoup plus fort au début
- 2 Choix d'une politique économique de LAE
 - DRS sur terres dégradées améliore peu les rendements mais ↘ Transports
 - G.C.E.S. sur terres productives ↗ les rendements mais ↘ peu Transports
 - ↗ les risques de ruissellement

2. Nuisances à l'aval (Off-Site) > < Citadins

- ↘ qualité des eaux, ↗ MES + pollution
 - ↗ prix eau potable
 - ↗ sociétés de pêche
 - ↗ envasement réservoirs / ports
- coulées boueuses / inondations des zones habitées mal placées.

Conclusions

- Les nuisances coûtent très cher et forcent les ETATS à réagir
- Généralement on améliore le drainage pour réduire les nuisance (= canaux en béton)
- Il faudrait soigner la cause et améliorer l'INFILTRATION en jouant sur le système de production.

FIG. 2.4 : LA SELECTIVITE, DANGER DE L'EROSION EN NAPPE

- Erosion en nappe = dangereuse car on la distingue mal : 12 t/ha = 1 mm.
= dangereuse car sélective >
 - colloïdes minéraux
 - M. O.
 - nutriments
- Tableau 2.1
Si on compare les terres érodées au sol en place
On constate une exportation préférentielle de
 - M. Organique
 - Argile + Limons jusqu'à 50 μ
 - Nutriments

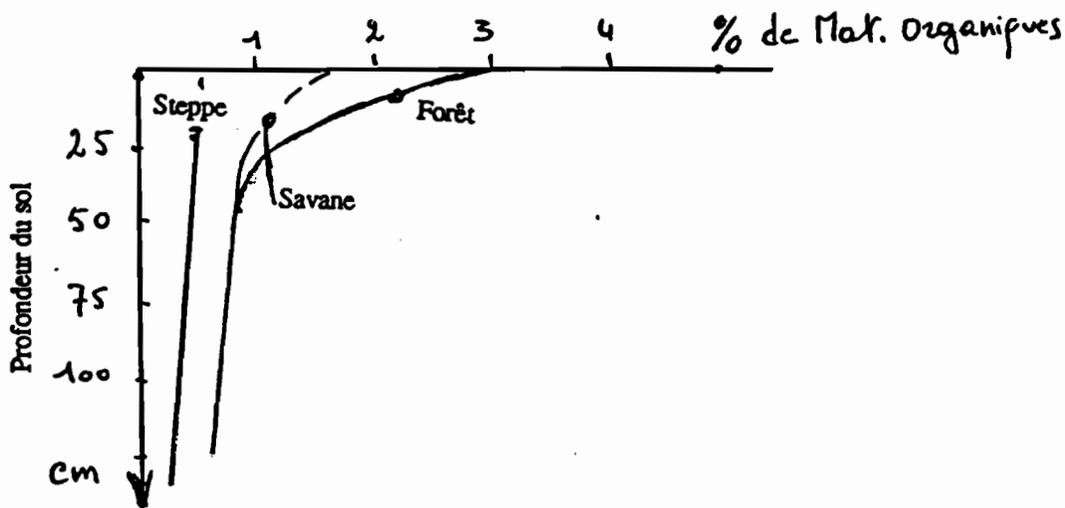
2 Raisons

- L'Energie du Ruissellement en nappe est faible à cause de la rugosité de la surface qui ralentit la nappe d'eau

d'où faible $\left\{ \begin{array}{l} \text{vitesse} \\ \text{compétence} \end{array} \right\}$ du Ruissellement en nappe

seules les particules légères x fines s'échappent

- La surface du sol est généralement la plus riche en M.O.



- Si Erosion ↗, on note l'apparition de rigoles (Erosion non sélectif) ⇒ sélectivité ↘

2 Conséquences

- Déséquilibre accéléré du bilan $\left\{ \begin{array}{l} \text{de M. Organiques} \\ \text{des nutriments} \end{array} \right\}$
- Squelettisation de l'horizon superficiel
⇒ effets cumulatifs sur le potentiel de production du sol.

ravine importante) et les retards à la production, se font sentir d'année en année. Il est intéressant de noter que sur 1.000 ha de petites parcelles défrichées et valorisées manuellement par des petits planteurs africains, il n'a jamais été question de problème d'érosion. La motorisation lourde réduit la capacité d'infiltration des sols, péjore le ruissellement qui se rassemble sur les pistes avant de raviner les parcelles. Sous les tropiques, l'effet de l'érosion est très rapide, de l'ordre de 2 à 4 ans, alors qu'il faut 30 ans pour observer de telles réactions aux excès de la motorisation en Europe.

Autre exemple. En Angleterre, des géographes ont étudié les manifestations de l'érosion sur une zone de 10 x 10 km au nord de Londres. Là encore, la surface touchée par l'érosion est modeste (5 %) mais concentrée en certaines zones du paysage : les fortes pentes cultivées par les paysans les plus pauvres. Ceux-ci, en effet, n'ont pas le choix de mettre au repos ou sous prairies permanentes, les fortes pentes bordant les plateaux loessiques : ils doivent assurer l'autosuffisance alimentaire ou tout au moins, des rentrées monétaires correspondantes. Or, les risques potentiels d'érosion sur ces fortes pentes, les dégâts en cas d'orages agressifs, sont bien plus grands que dans les terres de plateaux appartenant le plus souvent à des riches propriétaires. Il peut donc y avoir un lien entre les risques d'érosion - niveau socio-économique des paysans - terres fragiles et intérêt des paysans vis-à-vis de la lutte antiérosive.

Qui s'intéresse à la lutte antiérosive ? Les gros propriétaires de plus de 500 ha sont généralement peu concernés par l'érosion car ils peuvent facilement abandonner les terres dégradées, jusqu'à 2 à 10 % de leur surface aux friches où ils vont chasser le gibier. Les paysans les plus pauvres ne peuvent distraire la moindre surface cultivée ni les moindres ressources pour aménager leur terrain. Peu importe l'avenir pour eux, il faut d'abord assurer la nourriture quotidienne de la famille. Finalement, les plus concernés sont les moyens propriétaires (10 à 200 ha) qui comptent transmettre leur bien à leurs enfants. Eux seuls sont intéressés par l'amélioration de la stabilité de la production de leurs terres et sont prêts à investir dans l'aménagement s'il est source de revenus améliorés.

2.3.2 - Les pertes de rendement et la marge bénéficiaire.

Si les pertes de production (2 à 5 %) sont modestes et facilement compensées à l'échelle régionale par l'emploi de nouveaux intrants (engrais, drainage, travail du sol), la situation est bien différente pour un petit paysan. En effet, sur ces terres en pente forte, on peut trouver jusqu'à 10 % de surface perdue. Si l'on compte les pertes en engrais, la baisse de production peut atteindre 20 à 30 % et la baisse de revenus nets, une fois les

intrants remboursés, atteint 30 à 50 %. On observe donc que la marge bénéficiaire, celle qui est vitale pour sa famille, recule de façon très sérieuse. L'impact de l'érosion est donc plus important pour ce petit paysan mais, par manque de crédits, d'esprit d'initiative ou de savoir-faire, il ne peut y parer, à moins de changer radicalement de système de production (production à haute rentabilité). Il n'est donc pas étonnant que les pauvres s'appauvrissent : les riches, généralement se débrouillent mieux.

2.3.3. Effets de l'érosion sur la productivité des sols : grande diversité.

Aux U.S.A., devant le coût du service de conservation des sols et le faible impact de celui-ci sur les pertes en terre, on s'est demandé quelle a été l'influence de l'érosion sur la productivité des terres (= justification du système de C.E.S. de Monsieur Bennett). Sur les loess, sols profonds et homogènes, sur plusieurs mètres, on a constaté que la productivité n'a guère diminué. Au contraire, car l'influence perverse (- 1 %) de l'érosion fut facilement compensée par l'apport de nouveaux intrants (Dregne, 1988). Par contre, les sols forestiers dont la fertilité est concentrée en surface et de nombreux sols tropicaux peu épais, perdent très vite leur capacité de production (voir graph. 2.3 et fig. 2.4 : relations entre l'érosion et la fertilité potentielle).

2.3.4. L'érosion sélective des particules fines, des nutriments et des matières organiques.

Si on compare la qualité des terres érodées et des eaux ruisselées recueillies à l'aval des parcelles d'érosion, au sol en place sur 10 cm et ceci en fonction du couvert végétal et de l'intensité des pertes qui en découlent (voir tab. 2.1), on observe :

- 1°) Que les pertes en nutriments croissent parallèlement au volume ruisselé et érodé. Les teneurs en nutriments décroissent moins vite que les volumes de terre et d'eau déplacés augmentent.
- 2°) On retrouve bien plus d'éléments nutritifs dans les eaux et les terres érodées que dans le sol en place (horizon : 10 cm). Ceci est net pour le carbone, azote, phosphore, l'argile, les limons jusqu'à (50 microns) et encore plus flagrant pour les bases échangeables (14 à 18 fois plus sous culture). L'érosion en nappe est donc sélective vis à vis des nutriments et des colloïdes qui font l'essentiel de la fertilité des sols..

- 3°) La sélectivité de l'érosion en nappe est d'autant plus marquée que le volume érodé est faible, donc que l'on passe du sol nu à la culture et de la culture à la forêt. Ceci s'explique par le développement de rigoles sur sol nu, donc d'un décapage non sélectif.

Ceci s'explique aisément de deux manières (fig. 2.4). D'une part, la compétence du ruissellement en nappe est faible car la vitesse de celui-ci est ralentie par la rugosité de la surface du sol : des tiges, des racines découvertes et de la litière. Le ruissellement en nappe ne peut évacuer que des matières légères, des matières organiques, les argiles et limons auxquels sont liés la majorité des nutriments. D'autre part (voir fig. 2.4), les sols forestiers, et dans une moindre mesure, en sols de savane, accumulent en surface des matières organiques et les nutriments. Les pluies, battant la surface de ces sols, ce sont les premiers millimètres les plus riches, qui sont érodés les premiers. Plus l'érosion croît, plus elle provient de rigoles et de ravines, plus les horizons profonds, plus ou moins pauvres, sont concernés, de telle sorte que les terres érodées décapées sont moins sélectives.

2.3.5. Le coût des pertes en nutriments.

Un autre aspect des pertes économiques par l'érosion consiste à calculer combien il faudrait d'engrais et donc de crédits, pour compenser les pertes en nutriments par érosion. Ceci a été calculé par Roose (1973) en Basse-Côte d'Ivoire.

Par ailleurs, Stocking, en 1989, se basant sur les données d'analyses des terres et des eaux recueillies sur parcelles par Hudson au Zimbabwe, dans les années 1960, et sur la carte d'occupation des sols actuelle au Zimbabwe, a calculé que le pays perdait chaque année, du fait de l'érosion, 10.000.000 t d'azote et 5.000.000 t de phosphore.

Heureusement, les nutriments qui sortent des parcelles ne sont pas définitivement perdus pour le pays : ils peuvent être récupérés sur les parcelles situées en aval, nourrir les poissons des rivières et des lacs ou se retrouver sur les terres riches alluviales ou colluviales. Il n'empêche qu'avant de mettre à exécution un projet de fertilisation minérale des champs, il faut d'abord prévoir l'arrêt des pertes par érosion, qui dans le bilan chimique des sols cultivés, grève terriblement l'équilibre entre les pertes et les apports en nutriments (Roose, 1980 ; Roose, Lelong, 1983).

TABLEAU 2.1 : PERTES PAR EROSION SUPERFICIELLE SUR UNE PENTE DE 7 % à ADIOPODOUME EN FONCTION DU COUVERT VEGETAL

	Indice de sélectivité					
	Erosion totale (kg/ha/an) par rapport au sol en place (10 cm)					
	Forêt	Culture	Sol nu	Forêt	Culture	Sol nu
Carbone total	26,4	855,6	2 725	12,8	2,1	1,5
Azote totale	3,5	98,3	259	22,5	3,1	1,9
Phosphore total	0,5	28,5	111	6,6	1,4	1,3
CaO échangeable	3,0	49,9	113	492	18,5	9,7
MgO échangeable	2,2	29,0	45	327	14,1	5,1
K ₂ O échangeable	1,2	17,7	35	550	2,4	1,1
Na ₂ O échangeable	0,6	9,5	15	849	15,4	5,6
CaO total	3,7	57,1	139	216	8,8	5,0
MgO total	2,3	39,0	78	60	5,8	2,7
K ₂ O total	1,3	35,1	87	18	1,7	1,0
Na ₂ O total	0,6	12,6	27	49	3,2	1,6
Argile 0-2 microns	64,5	5 142	18 275	5,9	1,2	1,1
limons 2-50 microns	33,8	2 179	7 115	7,7	2,5	1,9
Sable fin 50-200 microns	1,7	5 174	23 135	0,1	0,6	0,6
Sable grossier 200-2000	0	19 305	89 375	0	0,9	0,9
					1,1	1,2
Erosion totale t/ha	0,11	32	138			
Ruissellement m ³ /ha	210	5 250	6 300			

- On observe d'abord que la somme des produits érodés est inférieure à l'érosion annoncée en bas de tableau puisqu'on n'a pas affiché les valeurs de Fe₂O₃, Al₂O₃ et SiO₂ (argiles), ni surtout celle du résidu insoluble au triacide (sables quartzeux).
- La croissance des pertes chimiques est presque parallèle à celle des pertes en terre : elle est donc fonction inverse du couvert végétal. Les concentrations en éléments nutritifs dans les substances érodées baissent quelque peu lorsque l'érosion croît, mais cette diminution est sans commune mesure avec l'augmentation des pertes en eau et en terre.
- L'érosion ayant des répercussions à court et moyen terme, il faut distinguer les éléments nutritifs directement assimilables (échangeables) de ceux inclus dans les réserves minérales.
- La migration du carbone et du phosphore se fait essentiellement sous forme solide (terre de fond et suspension). Par contre, la migration de l'azote, des bases totales et surtout des bases assimilables, se fait exclusivement en solution.

D'après Roose (1977).

2.3.6 - Pertes en production, dues au ruissellement.

La production de biomasse dans les pays chauds plus ou moins arides, dépend de la fertilité du sol, mais encore plus de l'eau disponible au moment où la plante cultivée en a besoin.

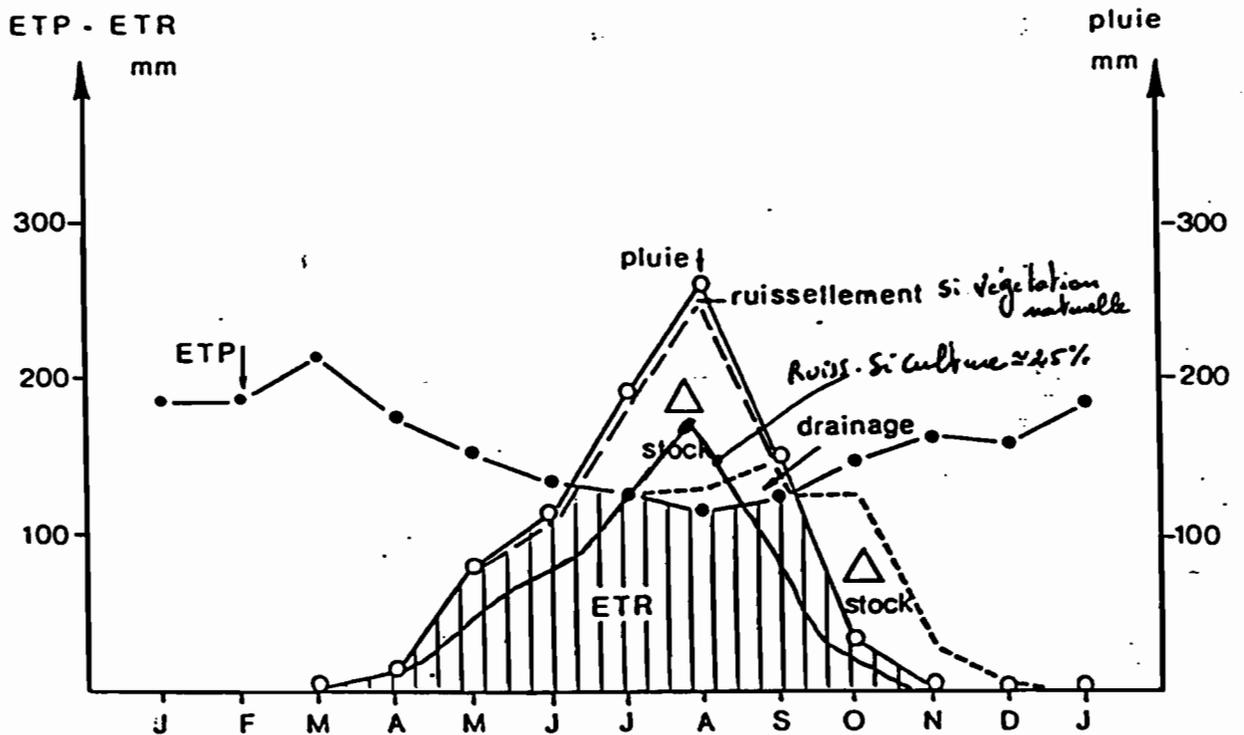
Or, si on calcule ne fusse que grossièrement le bilan hydrique (voir Roose, 1980 ou Somé, 1990), on constate qu'en zone sub-équatoriale, le développement d'un ruissellement de 25 % (ruissellement fréquent sous céréales, manioc et autres cultures vivrières) entraîne une réduction du volume d'eau qui draine au-delà des racines. Il y a donc une certaine compensation entre les pertes de nutriments par ruissellement et par drainage, mais on constate bien peu d'effets du ruissellement sur l'évapotranspiration réelle et la production de biomasse.

Par contre, en zone semi-aride (pluie inférieure à 700 mm/an), le même pourcentage de ruissellement effectivement observé sous cultures vivrières et sous coton, entame non seulement la possibilité de drainage (donc l'alimentation des nappes), mais réduit également l'évapotranspiration réelle et donc le potentiel de production de biomasse (voir schéma 2.5).

Dans la réalité quotidienne en zone aride, l'effet dépressif du ruissellement sur l'érosion est encore plus grave si, du fait du ruissellement, l'eau stockée vient à manquer en début de cycle de culture (= retard des semis), en cours de floraison (peu d'épis seront fécondés) ou en fin de cycle (remplissage imparfait des grains) à cause d'une mauvaise maîtrise du ruissellement et du stockage de l'eau dans le sol (Nicou, Somé, Ouattara, 1989). En zone soudano-sahélienne, il faut noter aussi l'impact très important du ruissellement lors des premiers orages de début de saison des pluies qui ruissellent sur l'ensemble des versants et nettoient la surface du sol des résidus organiques et des déjections animales accumulées tout au long de la saison sèche. Ces pertes d'éléments organiques entraînent une baisse notable de la productivité des terres sur les grands glacis des zones soudano-sahéliennes.

Un autre effet du ruissellement, général quel que soit le climat, c'est de réduire le temps de concentration des eaux pluviales, d'augmenter les débits de pointe (donc les transports solides et les dimensions nécessaires pour drainer les routes, les ponts, etc...) et de réduire les débits de base des rivières, en particulier en saison sèche, où l'on a besoin de l'eau pour irriguer. Cette mauvaise gestion de l'eau, à l'échelle du bassin versant, entraîne un manque à gagner plus ou moins important.

FIG. 2.5 : SCHEMA DE BILAN HYDRIQUE : SI VEGETATION NATURELLE
SI CULTURE KR



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	
! Pluie mm	0	0	1	19	81	116	191	264	151	37	0	0	860 mm	%
! ETP	187	188	216	178	155	136	129	116	126	149	165	160	1905 mm	222
! Ruiss.	0	0	0	0	.2	3	5	7	4	0	0	0	21 mm	2,5
! ETR brut	0	0	1	19	79	113	129	116	126	37	0	0	620 mm	72
! ETR corrigé	0	0	"	"	"	"	"	"	"	149	82	0	814 mm	94,6
! Drain brut	0	0	0	0	0	0	57	141	21	0	0	0	219 mm	25,5
! Drain corrigé	0	"	"	"	"	"	0	4	21	0	0	-0	25 mm	2,9

- Schéma de bilan hydrique moyen pour la région de Ouagadougou.
Savane soudano-sahélienne:

Les hydrologues, qui recherchent souvent des bassins à forte hydraulicité (c'est-à-dire, à fort écoulement après chaque pluie) pour alimenter les lacs, les réservoirs d'eau ou les villes, ont un point de vue très différent des agronomes qui recherchent pour leur part une meilleure infiltration, la meilleure évapotranspiration réelle pour assurer la meilleure production végétale. Hydrologues et agronomes sont par contre d'accord, pour rechercher des eaux claires et une distribution la plus étalée possible des débits tout au long de l'année, ce qui est conforme avec les principes d'un bon aménagement. Cependant, dans les zones arides, il faut quelquefois sacrifier certaines surfaces de versants servant d'impluvium pour assurer la croissance des cultures sur des surfaces restreintes (Roose, 1989).

2.3.7. Réduction du potentiel de production du sol par l'érosion

L'influence du ruissellement et de l'érosion n'est pas seulement néfaste pour le rendement des cultures de l'année où l'érosion s'est produite : elle peut aussi avoir des retombées graves sur les potentialités des sols, en particulier sur les sols superficiels (faible capacité de stockage de l'eau et des engrais) et des sols forestiers (la fertilité et l'activité biologique sont concentrées dans les horizons superficiels).

Lal au Nigéria, El Swaify à Hawaï, ont procédé aux comparaisons suivantes :

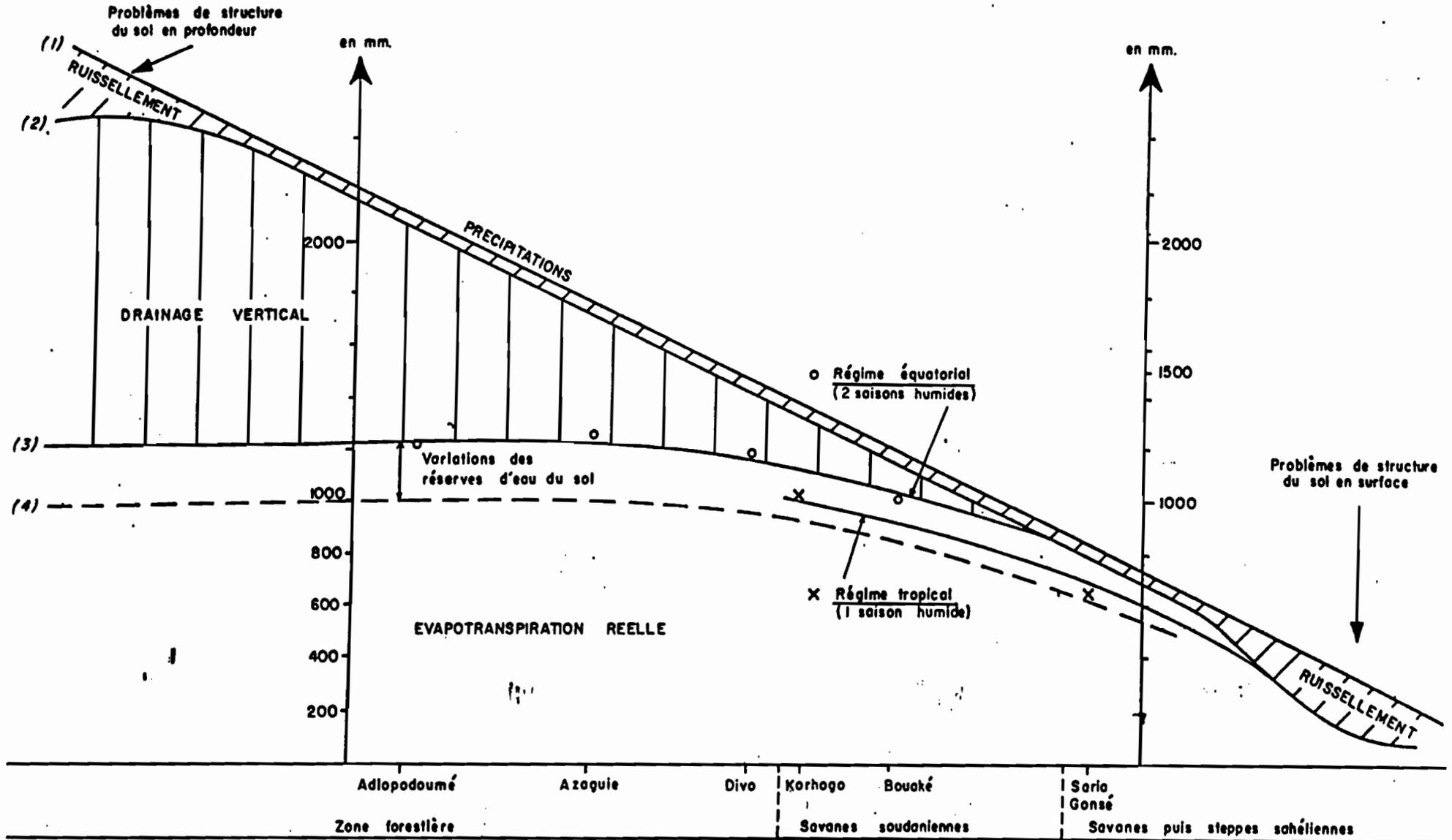
- a) Après six années de mesure de l'érosion, sous différents systèmes de cultures, dans des parcelles d'érosion, à l'IITA, Ibadan (Nigéria), Lal disposait de 20 parcelles d'érosion ayant subi différents taux d'érosion en fonction de différents systèmes de production. Sur ces parcelles d'un niveau de dégradation varié, il a implanté du maïs après avoir épandé une dose d'engrais minéraux suffisante pour produire 25 quintaux de grain.

On voit, à la fig. 2.6, courbe 1, que le rendement du maïs diminue rapidement sur les terres érodées malgré l'apport satisfaisant d'engrais minéraux.

L'érosion a donc une action sur le potentiel de production d'un sol. On constate, dans le cas de ce sol ferrallitique désaturé (alfisol), que si ce sol a été érodé, il n'est plus capable de stocker l'eau et les nutriments pour les fournir à la culture en temps opportun. De même, il a perdu une partie des éléments biogènes contenus dans l'horizon humifère : la mise en disponibilité des éléments nutritifs contenus dans le sol par les microorganismes s'effectue mal ou plus lentement.

FIG. 2.6 : EVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE SOUS VEGETATION NATURELLE

en fonction du climat en milieu tropical



- b) Parallèlement, des parcelles voisines ont été décapées sur 5 - 10 - 15 - 20 cm d'épaisseur au bulldozer, puis fertilisées et plantées de la même façon en maïs.

L'allure de la courbe 2 sur la fig. 2.6 est la même, mais les pertes de rendement ne sont pas aussi graves que dans le cas d'une érosion en nappe sélective naturelle des parcelles d'érosion.

Ceci montre à quel point l'érosion en nappe, peu apparente sur le terrain pour des yeux non prévenus, a un impact grave à long terme sur la capacité de production des terres. Sur le champ lui-même, l'érosion a donc un impact modéré sur les rendements immédiats. Mais, cet effet dépressif, s'accumule au cours du temps pour réduire sérieusement la capacité de production d'un sol :

- perte de matières organiques et des particules fines,
- perte de capacité d'infiltration,
- perte de stabilité structurale et surtout,
- perte de capacité de stockage de l'eau et des nutriments.

Bref, un sol dégradé est un sol fatigué qui ne réagit plus bien aux engrais minéraux.

Pendant, dans certains cas on peut se demander si le décapage de très vieux sols ferrallitiques complètement désaturés et acides n'augmenterait pas leur productivité... mais, à quel prix ? Il faudrait en effet, considérer l'impact d'énormes transports solides qui ensablent les plaines plus riches et prévoir un investissement important pour restaurer la fertilité biologique de ces sols rajeunis. En réalité, on connaît, en Côte d'Ivoire par exemple, des sols ferrallitiques rajeunis peu épais, sur des altérites riches en minéraux altérables (donc en nutriments) : l'inconvénient de ces sols, c'est que beaucoup d'entre eux, décapés il y a fort longtemps, ont accumulé une "stone line", c'est à dire une couche graveleuse à faible profondeur qui limite l'utilisation de ces sols et la mécanisation de leur exploitation.

2.4. LES NUISANCES EN AVAL (conséquences "off-site")

L'érosion a, somme toute, des influences négatives très variables sur les rendements (nulle à forte) et sur le potentiel de production des terres. Mais le coût des nuisances à l'aval des champs érodés est généralement bien plus élevé, les effets sont bien plus spectaculaires, et justifient la plupart des interventions importantes dans le domaine de la lutte anti-érosive.

C'est le cas de la Restauration des Terrains en Montagne (R.T.M.) qui vise le maintien des voies de communication en montagne et la protection des vallées aménagées. C'est le cas de la D.R.S. (Défense et Restauration des Sols) dont l'objectif est d'éviter l'envasement trop rapide des barrages, la destruction d'ouvrages d'art, de routes et de villages.

Même la C.E.S. (Conservation de l'Eau et des Sols), qui officiellement, vise à maintenir la capacité de production des terres, en réalité, vise surtout la protection de la qualité des eaux, si indispensable aux citoyens. Cela justifie les efforts considérables de l'Etat pour aider techniquement et financièrement les paysans (plus ou moins volontaires selon les régions) à aménager leurs terres. Rappelons qu'aux U.S.A., près de 50 % des chercheurs du service de conservation de l'eau et des sols, s'occupent de la qualité des eaux et des pollutions diverses, plutôt que de la lutte antiérosive.

Les nuisances à l'aval, c'est d'abord la baisse de la qualité des eaux des rivières par les matières en suspension (M.E.S.) qui accompagnent la crue formée en majorité par le ruissellement et avec la charge en suspension, les charges organiques (danger pour l'oxygène nécessaire à la faune) liées par exemple à l'élevage intensif (lisier). Les apports d'azote et de phosphore (engrais minéraux utilisés par des paysans) qui vont entraîner l'eutrophisation des étangs (envahissement par les algues, qui à leur tour, vont étouffer les poissons). Les nuisances proviennent aussi des transports solides liés aux grandes crues qui laissent des torrents de boue au bas des champs, dans les fossés, sur les routes, dans les caves, sédiments qui, une fois le débit de pointe passé, vont se déposer dans les lacs, les fleuves, les canaux et les ports.

C'est ainsi que la durée de vie des barrages, élément essentiel de leur rentabilité économique, varie considérablement d'une région à une autre, et dans une même région, en fonction des dimensions respectives du réservoir et du bassin, mais aussi du climat et de l'aménagement des versants, des ravines et des berges des rivières.

Alors que le barrage de Kossoug, construit dans les savanes arborées du centre de la Côte d'Ivoire, ne risque pas d'être envasé avant un millénaire, les principaux réservoirs du Maghreb ont une durée de vie très courte (25 à 60 ans) et les lacs collinaires (petits réservoirs, très près des sources de sédiments) ont des durées de vie limitées souvent, de 2 à 10 ans.

Quand on sait le prix du moindre barrage, on comprend l'effort colossal mis en place pour réduire les transports solides en zone méditerranéenne où la lithologie est faite de masses argileuses, marneuses, de grès ou schistes tendres, alternant avec des bancs calcaires ou gréseux durs, entraînant des pentes fortes et des couverts végétaux souvent fort dégradés.

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les têtes de vallées (50.000 ha), les "bad-lands", fixer les ravines et corriger les torrents, aménager 400.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de D.R.S. puis par la Direction Nationale des Forêts). Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages : R.T.M. en faveur de la qualité des eaux et des besoins des citadins des grandes villes. Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées. Les travaux de Heusch (1973 et 1983) et Demmak (1982) montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs provient du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. C'est donc dans ces basses vallées et dans les moyennes vallées, qu'il faudrait intervenir pour piéger les sédiments, tout en aménageant les versants cultivés pour réduire le ruissellement (amélioration foncière, techniques culturales pour couvrir le sol en hiver). Des méthodes de calcul économique existent, qui permettent de choisir les interventions de lutte antiérosive les plus efficaces, en se basant sur les coûts des traitements antiérosifs, des nuisances auxquelles on peut s'attendre en l'absence d'intervention (voir les cours du CEMAGREF de Grenoble).

2.5 - LES ELEMENTS DU CHOIX D'UNE POLITIQUE ECONOMIQUE DE LUTTE ANTI-EROSIVE

Jusqu'ici, la lutte anti-érosive était conçue comme un moyen d'assurer la conservation de la productivité des terres à long terme. Il était donc bien difficile de justifier la rentabilité à court terme des projets de lutte antiérosive. Face à l'immensité de la tâche, des sommes dérisoires ont été consacrées à des volets de protection des terres, à l'intérieur de projets intégrés de développement régional. Les sommes disponibles étant limitées, il faut faire des choix en fonction des objectifs affichés. La fig. 2.7 permet de raisonner sur ces choix des sites d'intervention en fonction des objectifs des projets. A la fig. 2.7, apparaît une différence de réaction de deux types de sols, face à l'érosion. La courbe 1 montre la perte rapide de productivité d'un sol forestier, où la fertilité est

localisée en surface. A la courbe 2, on observe que la perte de productivité d'un loess profond reste faible, même si l'érosion est forte, car le sol fertile est épais, et sa capacité à stocker l'eau et les nutriments n'est guère diminuée (sauf par la perte des matières organiques de surface).

La stratégie traditionnelle jusqu'ici appliquée par les forestiers et les hydrologues (R.T.M. et D.R.S.) consistait à intervenir là où les transports solides sont les plus élevés : sur les pentes fortes, dans les ravines, les "bad-land" et les sols stériles épuisés. On constate que l'impact de cette lutte antiérosive est très faible sur la productivité des terres 1 et 2 (= DR1 sur la figure) : d'où la réticence des paysans devant les équipements imposés, par exemple les banquettes, qui n'améliorent pas les rendements.

Pour obtenir une forte influence sur l'amélioration de la productivité des terres (DR2), ce n'est pas sur les terres épuisées, qu'il faut intervenir, ni sur les sols profonds (terre 2), mais sur les sols à fertilité superficielle, encore en bon état : la courbe 1 est beaucoup plus raide en cas de faible érosion que lorsque l'érosion est déjà forte et les sols trop dégradés. Cette approche, préconisée par la Gestion Conservatoire de l'Eau et de la Fertilité des Sols (G.C.E.S.) où l'amélioration modeste des systèmes de production permet un meilleur stockage des eaux pluviales, une plus forte production de biomasse, une meilleure couverture du sol et donc par conséquent, beaucoup moins d'érosion.

Si donc, on veut rentabiliser au mieux les crédits consacrés à la protection des terres, il est logique d'investir sur les meilleures terres en production pour prévenir leur dégradation (car il vaut mieux prévenir que guérir) ou encore, restaurer la production des terres qui commencent juste à se dégrader, plutôt que d'investir dans des terres complètement décapées qui exigent un fort investissement pour retrouver une productivité acceptable.

Par contre, si on cherche à limiter les transports solides et les risques d'envasement, ou encore si on vise des objectifs sociaux (donner du travail aux plus pauvres, dans les zones à forte émigration), c'est dans les zones les plus dégradées et les plus proches du lit de la rivière (correction de ravines, des berges et des torrents) c'est là qu'il faut intervenir.

En conclusion, il faut définir clairement les objectifs à atteindre avant de proposer des méthodes de lutte antiérosive.

Si on cherche à réduire la dégradation des terres (logique amont, paysanne), il faut développer des techniques capables d'augmenter rapidement leur productivité (augmenter leur capacité d'infiltration, apporter des engrais, des soins phytosanitaires, etc...) : les paysans trouveront rapidement un intérêt à participer à ces projets.

Si par contre, on cherche à réduire les risques d'envasement (logique aval, propre aux citadins), l'intervention ne peut intéresser des paysans que moyennant des incitations ou des compensations aux surfaces de production perdues, aux heures de travail, aux inconvénients divers imposés sur les versants cultivés pour réduire ou gérer le ruissellement (fossés, banquettes, etc...). Il ne faut pas trop compter sur les paysans pour l'entretien de ces structures, toujours dangereuses en cas de débordements (ravinement).

2.6 - CONCLUSION : NECESSITE D'UNE ANALYSE SOCIOLOGIQUE ET ECONOMIQUE DES CONSEQUENCES DES PROJETS DE LUTTE ANTI-EROSIVE

Au niveau mondial, les problèmes de dégradation des terres sont préoccupants, mais pas encore catastrophiques.

Cependant, localement, les pertes de rendement et du potentiel de production des terres réduisent à néant les profits des petits paysans ou entraînent une augmentation des risques de famine. Ceux-ci réapparaissent, un peu partout en Afrique avec la forte pression démographique. D'où, la nécessité de migration des adultes de certaines régions (exemple, autour du Sahel) pour assurer un complément de revenus pour alimenter leur famille. Il faudra en tenir compte car ces adultes vont manquer lors des programmes d'aménagement de terroirs où l'on fait appel à une abondante main-d'oeuvre locale.

L'impact économique de l'érosion est très variable d'un sol profond homogène à un sol où la fertilité est limitée aux horizons superficiels, mais les recherches sont en cours pour préciser sur quels sols les investissements en lutte antiérosive sont les plus rentables.

Des études complémentaires sont encore nécessaires pour établir l'efficacité, la faisabilité et le coût comparatif des différentes méthodes de lutte antiérosive et pour modéliser les aménagements les plus économiques pour chaque région.

Les premiers résultats montrent clairement qu'il est plus profitable pour les paysans, d'investir les crédits limités dont on dispose, pour aménager correctement les terres d'avenir qui n'ont pas encore trop souffert. Cependant, jusqu'ici on a développé surtout la R.T.M. et la D.R.S. pour intervenir sur les zones très dégradées, abandonnées par les paysans, pour réduire les transports solides... et maintenir à grand prix la qualité des eaux nécessaires à l'épanouissement des grandes villes.

Si on veut obtenir la participation paysanne, il est clair qu'il faut rentrer dans la logique paysanne (c'est à dire améliorer rapidement la productivité des terres, ou mieux, la productivité du travail), ou encore prévoir des incitations et compensations de l'Etat, face à l'effort fourni par les paysans pour atteindre des objectifs nationaux (qualité des eaux des citoyens).

DEUXIEME PARTIE

LA LUTTE ANTIEROSIVE EN FONCTION DES DIFFERENTS PROCESSUS D'EROSION

INTRODUCTION :

Dans cette seconde partie, il sera tenu compte de la variété des formes d'érosion observées pour diversifier la lutte antiérosive et l'adapter le plus étroitement possible aux niches écologiques et aux segments fonctionnels de chaque versant. En effet, les formes d'érosion traduisent l'efficacité locale de divers processus qui font appel à des sources d'énergie variées et à différents facteurs modifiant leur expression.

Bien qu'il y ait parfois une évolution d'une forme d'érosion vers une autre, à mesure que la dégradation progresse (par exemple l'érosion en nappes évolue en rigoles puis en ravines) chacun de ces ensembles (forme, cause, facteur, méthode) sera traité dans un chapitre séparé de taille variable, en fonction des connaissances plus ou moins poussées. Etant donné l'objectif de cet ouvrage, qui est de développer la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols, l'érosion en nappe, phase initiale des processus d'érosion, sera traitée plus en détail, à l'aide de résultats expérimentaux autant que possible. Pour lutter contre les autres processus, nous rappellerons les principes de base et quelques résultats récents : puis nous renverrons le lecteur vers d'autres manuels plus spécialisés.

Tableau 3.1 : Les formes d'érosion, leurs causes, les facteurs de résistance du milieu ainsi que leurs conséquences sont très variées.

Les processus d'érosion et les formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu	Les conséquences : sélectivité de l'érosion et des dépôts
<p>Dégradation : perte de structure</p> <p>Formes : naissance de pellicules de battance</p>	<p>Nombreuses :</p> <ul style="list-style-type: none"> - minéralisation des matières organiques - battance des gouttes de pluie - salinisation - compaction 	<p>1° la résistance de la structure est fonction des matières organiques, du fer, de l'alumine, des argiles floculées, des cations adsorbés et des sols présents</p> <p>2° fonction du drainage ou de la nappe chargée</p> <p>3° et la compaction est fonction du poids des outils utilisés et de la pression des pneus des tracteurs ; de la fréquence des passages</p>	<p>La dégradation entraîne peu de transport</p>
<p>Erosion éolienne</p> <p>Formes : ripple marks, monticules au pied des touffes, dunes, nuages de poussière</p>	<p>Energie du vent</p>	<p>1° vitesse du vent et de la turbulence de l'air</p> <p>2° direction du vent dominant</p> <p>3° résistance du milieu est fonction de la rugosité du sol et de la végétation.</p> <p>4° résistance du sol = fonction de la structure des mottes, de la texture et des matières organiques</p>	<p>Sélectivité</p> <p>Erosion : + +</p> <p>Dépôt : + +</p>
<p>Erosion mécanique sèche</p> <p>Formes : creeping</p>	<p>Gravité et poussée par les outils de travail du sol</p>	<p>1° est fonction de l'intensité du travail du sol c'est-à-dire de la fréquence des travaux et du type d'outil</p> <p>2° est fonction de la pente et de la cohésion du terrain</p>	<p>Sélectivité</p> <p>Erosion : 0</p> <p>Dépôt : 0</p>
<p>Erosion en nappe</p> <p>Forme : nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, demoiselle coiffée, micro falaise.</p>	<p>Battance des gouttes de pluie</p>	<p>1° le couvert végétal</p> <p>2° la pente</p> <p>3° le sol</p> <p>4° les techniques et structures antiérosives</p>	<p>Erosion : + +</p> <p>Dépôt : + +</p>
<p>Erosion linéaire</p> <p>Formes : griffes, rigoles, ravines.</p>	<p>L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse</p> <p>$1/2 MV^2 = 1/2 MGH$</p>	<p>1° la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité</p> <p>2° le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration</p> <p>3° résistance du profil du sol et des racines</p>	<p>Erosion : 0</p> <p>Dépôt : + +</p>
<p>Erosion en masse</p> <p>Formes : creeping, glissement, coulée boueuse</p>	<p>Gravité, déséquilibre des versants</p>	<p>1° le poids de la couverture sol + eau + végétaux</p> <p>2° l'humidification du plan de glissement</p> <p>3° le terrain :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. la lithologie et le pendage parallèle à la pente b. des niveaux imperméables et du mica c. le drainage, la pente et une faible épaisseur du sol au-dessus du niveau imperméable 	<p>Erosion : 0</p> <p>Dépôt : 0</p>

3 - L'EROSION MECANIQUE SECHE

3.1 - DEFINITION. FORMES. PROCESSUS

Voici un processus d'érosion (arrachement + transport + dépôt) peu connu, très peu quantifié, qui sans intervention de l'eau, par simple poussée des instruments aratoires sur les couches superficielles du sol, décape des horizons superficiels des hauts de pente et des ruptures de pente, pousse ces masses de terre vers le bas de la toposéquence où elles s'accumulent soit en talus, en bordure de parcelles, soit en colluvions concaves de texture peu différente des horizons d'origine (ni érosion, ni dépôt sélectif).

Chaque labour entraîne une tranche de terre (10 t/ha si la parcelle fait 100 m de large x 100 m de haut) et chaque sarclage déplace quelques mottes de terre vers le bas (soit environ 1 t/ha). Au bout du compte, on arrive en Equateur (De Noni, Viennot, 1990) à devoir monter une murette de 130 cm en 24 mois, soit environ 40 t/ha/an et on construit des talus de 1 m en 4 à 5 ans, soit un rehaussement de 20 cm environ par an en Côte d'Ivoire, au Rwanda et au Burundi (Roose, Bertrand, 1971 et Roose *et al*, 1990).

En Algérie, sur un versant de 35 % de pente sur sol fersiallitique rouge, un verger fut planté vers 1960. Trente ans plus tard, les arbres sont juchés sur un piédestal : 40 cm de terre ont été décapés entre les arbres ! L'érosion en nappe mesurée ne dépasse pas 5 t/ha/an soit $0,33 \text{ mm} \times 30 \text{ ans} = 10 \text{ mm}$. Il reste donc 39 cm de terre déplacée par les tracteurs qui, deux fois par an (à l'automne et au printemps) labourent le sol en croisé pour maintenir le sol nu et motteux. Cela correspond à $13 \text{ mm} \times 15 \text{ t/ha/an} = 195 \text{ t/ha/an}$.

3.2 - LES FACTEURS

L'intensité du travail du sol dépend :

- 1 - du type d'outil : la charrue à soc déplace plus de terre que le chiesel (Revel, 1989), et plus que les charrues à disques, que la houe et que la herse.
- 2 - de la fréquence des passages : en zone humide, à deux saisons des pluies, il y a deux labours plus quatre sarclages. En zone tropicale humide à une saison, il y a un labour plus deux sarclages. En zone semi aride il y a un labour plus un sarclage et en zone tempérée, il y a un labour et deux ou trois hersages.

- 3 - **de l'orientation du travail** : le travail du sol peut être effectué soit en courbe de niveau et le versoir orienté vers l'aval ou bien vers l'amont. Le travail peut s'effectuer du haut de la colline vers le bas (c'est le cas général pour les tracteurs lorsqu'ils cultivent en zone de pentes supérieures à 15 %). Et enfin, le travail peut s'effectuer de bas en haut, c'est le cas général des travaux manuels dans les pays en développement. Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est très rare, que l'on récupère dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas, en particulier, sur les vignes. On constate aussi que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche (Revel, 1989).
- 4 - **de la pente**. Plus la pente est forte et plus la poussée va loin et les mottes détachées par la houe roulent bas. En zone de montagne, les hauts de pente et sommets des collines sont souvent décapés, ce qui dénote d'une érosion en nappe qui n'est pas compensée et surtout d'une érosion mécanique sèche.

Les ruptures de pente sont aussi usées, la surface du sol plus claire et les horizons humifères sont moins épais : il doit donc y avoir accélération lorsque la pente est forte et ralentissement ou colluvionnement sur les pentes plus faibles, en particulier sur les talus ou les bas de pente. La récolte des betteraves à sucre ou des pommes de terre en terrain limoneux un peu humide entraîne un déplacement de 15 à 50 tonnes de terre/ha/an soit 1 à 3 mm/an. Bolline, dans le Brabant belge, a mesuré sur parcelles, une perte de terre de l'ordre de 30 t/ha/an par érosion en nappes et rigoles. On voit que l'on a souvent confondu les deux processus : érosion en nappe et érosion mécanique sèche et qu'on a expliqué les taches blanches en haut de pente et en rupture de pente comme étant la preuve d'une érosion en nappe alors que l'érosion mécanique sèche par les outils est probablement deux à dix fois plus efficace que l'érosion en nappe.

3.3 - METHODES DE LUTTE ANTIEROSIVE

On a souvent confondu la lutte contre l'érosion en nappe et contre l'érosion mécanique sèche car les facteurs et les méthodes de lutte se recoupent.

Premier point : réduire le nombre de passages des outils et l'importance du travail des sols. On en arrive au travail réduit au minimum (minimum

tillage) où les résidus de culture sont abandonnés à la surface du sol et l'on ne cultive plus au printemps que des raies qui couvrent 10 % de la surface du sol. C'est la méthode la plus efficace qui a été étudiée dans le Lauragais (voir Roose et Cavalié, 1986).

Deuxième point : il faut réduire l'énergie dépensée pour le travail du sol. Il n'est pas toujours nécessaire de retourner le sol avec une charrue. Un simple éclatement par les dents de chiesel par exemple, aère en profondeur, augmente la macroporosité, la capacité de stockage de l'eau, l'enracinement et maintient en surface la matière organique et les résidus de culture. A la limite, le travail minimum du sol se réduit à une simple raie alors que le reste du sol est couvert par un paillis de résidus : ce travail divise par 10 les risques d'érosion mécanique sèche par les outils.

Troisième point : l'orientation du travail. Si la pente est inférieure à 14 %, il est possible de travailler mécaniquement le sol, alternativement dans un sens et dans l'autre, d'où des compensations ou ralentissement des transports solides (Revel, 1989). Si par contre la pente est supérieure à 14 %, les tracteurs risquent de verser : il faut donc, ou bien cloisonner le paysage en bandes cultivées entre des talus et réduire suffisamment la pente, ou bien développer des cultures pérennes sans travail du sol avec des plantes de couverture ou avec paillage, ou bien labourer et sarcler dans le sens de la plus grande pente mais semer perpendiculairement à la pente et prévoir des barrages, des petits ressauts, des petites diguettes, tous les 10 m ou des cultures manuelles localisées espacées le plus possible dans le temps.

Quatrième point : il s'agit de former des talus de manière à maintenir à chaque niveau de versant des horizons d'accumulation de la fertilité de l'eau et du sol qui vont évoluer en terrasses progressives. Ceci n'est valable que si les sols sont suffisamment profonds sinon on est amené à rapprocher les talus de moins de 5 m et à maintenir une certaine pente sur la terrasse cultivée en travaillant la terre sur planches ou sur gros billons perpendiculaires à la pente lorsque celle-ci dépasse 40 % (Latrille, 1981, exemple des îles Comores).

4 - L'EROSION EN NAPPE OU LE STADE INITIAL DE L'EROSION HYDRIQUE

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire (= sheet erosion) parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion.

4.1 - LES FORMES ET LES SYMPTOMES DE L'EROSION EN NAPPE

L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. De ce fait elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion importante de 15 à 30 t/ha/an entraîne une perte de hauteur de 1 à 2 mm, laquelle est peu significative par rapport au foisonnement des terres, à la rugosité du sol après les travaux culturaux (D H = 2 à 10 cm) ou par rapport à la respiration des sols à argile gonflante, du simple fait de leur réhumectation (D H de plusieurs centimètres). Cependant, combinée à l'érosion mécanique sèche (et à la dégradation de la macroporosité suite à la minéralisation accélérée des matières organiques, ou par simple tassement par les outils), l'érosion en nappe peut entraîner un décapage de la majorité de l'horizon humifère sombre en quelques dizaines d'années (D H de 10 à 20 cm par rapport au profil voisin resté sous forêt). Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pentes).

Le deuxième symptôme est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol (labour, dents, houe, trident). Les paysans disent que "les cailloux poussent" ! Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973 et Poesen, 1988). Si le sol contient du sable, la battance des gouttes de pluie va détacher des particules des mottes, les raboter et former d'une part des pellicules structurales de battance ou d'érosion (réarrangement superficiel des mottes) et des croûtes de sédimentation, et d'autre part :

- des voiles de sable lavé, blanc en milieu acide, rosé ou roux si les sables sont ferrugineux,
- des cratères sombres dans ces voiles sableux clairs (reliquats des dernières grosses gouttes),
- et des colonettes sous les feuilles larges qui protègent le sol contre la battance.

Mais les formes les plus démonstratives sont les microdemoiselles coiffées, petits piédestals de terre coiffés d'un objet dur résistant à l'attaque des gouttes de pluie (graines, racines, feuilles, cailloux ou simples croûtes de terre tassée protégées par des lichens). Leur hauteur (0,5 à 15 cm) est d'autant plus forte que l'érosion est forte, c'est à dire sur sol nu, peu cohérent et sur forte pente. Ces colonettes sont la preuve que l'énergie des gouttes de pluie attaque la surface du sol et que le ruissellement emporte les particules fines et légères mais que son énergie n'est pas assez forte pour cisailer la base des colonettes. A partir du moment où le ruissellement devient abondant, il se hiérarchise et développe une énergie propre suffisante pour attaquer le fond et les bordures de son lit : il va cisailer les microdemoiselles coiffées et laisser en place des microfalaises (D H = 1 à 10 cm). L'érosion en nappe va alors se combiner à l'érosion linéaire pour former l'érosion en nappe et rigoles (rill and interill erosion), laquelle peut évoluer vers des griffes (H = quelques cm) des rigoles (H = 10 à 50 cm) et des ravines (H = plus de 50 cm) si on n'intervient pas pour corriger les problèmes d'érosion débutante : (= érosion mécanique sèche + érosion en nappe + griffes et rigoles) (Roose, 1967, 1977).

Voir photo

Les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- 1 - La squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sable et de gravier, plus claire que l'horizon humifère sous-jacent.
- 2 - Le nivellement de la surface du sol par dégradation des mottes et remplissage des creux entre mottes. Il s'ensuit des croûtes diverses, lisses et blanchies (exemple : zipellé en Moré veut dire : zone blanchie).
- 3 - Le décapage de l'horizon humifère laissant des plages de couleur claire.

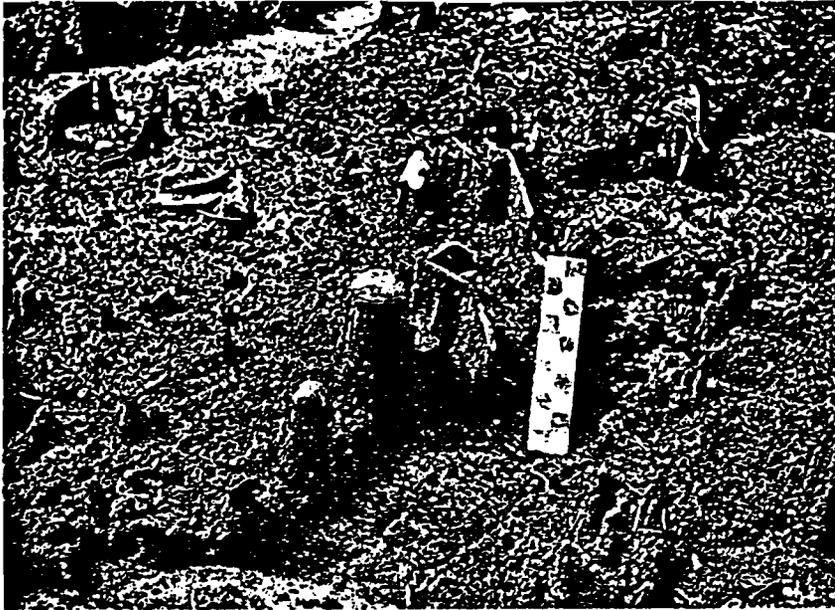


Photo 15 - L'énergie des gouttes de pluie est à l'origine de nombreuses manifestations de l'érosion à la surface du sol.

a - les microdemoiselles coiffées.

colonnettes de terre protégées de l'agressivité des gouttes de pluie par un échapeau cohérent : graine, racine, feuille, caillou ou terre durcie.

Plus la pente est forte, plus l'érosion est forte et plus les colonnettes sont élevées.



b - les cônes de projection.

les gouttes d'eau désagrègent les mottes et projettent des particules en tous sens. Ces particules s'accumulent au pied des tiges protégées par une touffe de feuilles.



c - les cratères.

les gouttes de pluie se rassemblent quelquefois sur les feuilles des végétaux (gouttières ou ligules), augmentent leur volume et pilonnent le sol avec une énergie cinétique accrue ; témoins ces cratères observés à la surface du sol autour de touffes de manioc.

4.2 - LA CAUSE ET LES PROCESSUS D'EROSION EN NAPPE

La cause de l'érosion en nappe est l'énergie de la battance des pluies sur les sols dénudés (Ellison, 1944).

L'arrachement des particules de terre vient de l'énergie des gouttes de pluie, lesquelles sont caractérisées par une vitesse de chute (fonction de leur hauteur de chute et de la vitesse du vent) et par un certain poids, fonction de leurs diamètres. Au bout de 10 m de chute, la vitesse des gouttes de pluie atteint 90 % de sa vitesse finale, déterminée par l'équilibre entre l'attraction universelle et la résistance à l'air de la surface portante de la goutte (voir Ellison, Lawson, 1940, Bradford, 1983). Le vent peut augmenter l'énergie des gouttes de pluie de 20 à 50 % (Lal, 1975) mais les turbulences réduisent la taille des gouttes de pluie à 3 à 5 mm. Sous la cime des grands arbres, l'énergie des gouttes de pluie est souvent plus forte que dans la parcelle cultivée car les gouttes se réunissent sur les ligules des feuilles, formant des gouttes plus grosses. Dans chaque région on peut observer le diamètre des populations de gouttes tombant pour des averses de différentes intensités. On peut aboutir à des régressions du type énergie d'une averse = énergie de chaque tranche de pluie tombant à une intensité donnée, soit le nombre de millimètres tombés à cette intensité (voir fig. énergie en fonction de l'intensité des pluies). En l'absence de données régionales sur l'énergie des pluies, on peut utiliser les données de Wischmeier et Schmith, 1978.

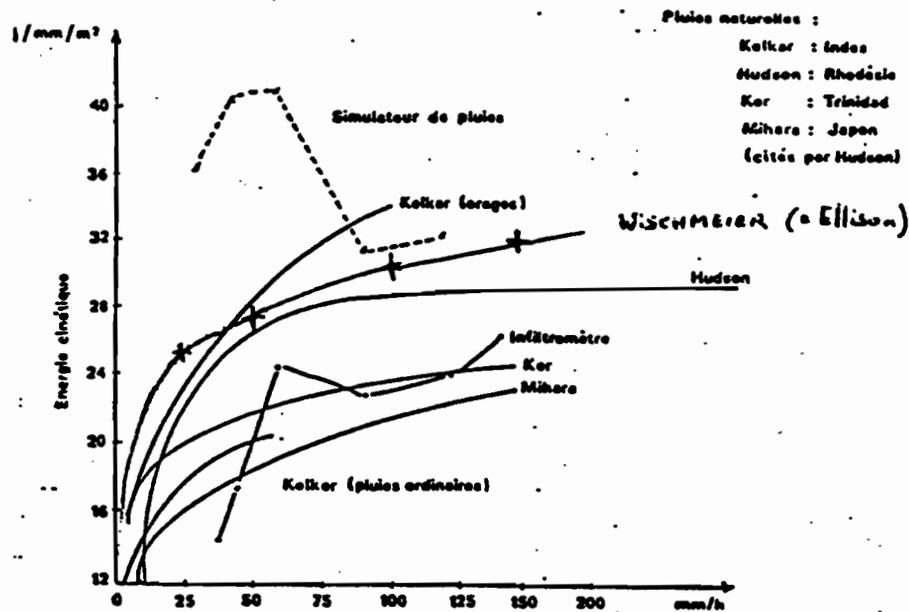


FIG. 4.2 : ENERGIE CINETIQUE DES PLUIES EN FONCTION DE LEUR INTENSITE

Cette énergie de battance est dissipée par quatre actions :

- 1 - Tassement du sol sous l'impact des pluies : humectation rapide de la surface du sol.**
- 2 - Ecrasement et force tangentielle de cisaillement : séparation des particules agrégées.**
- 3 - Projection des particules élémentaires selon une couronne sur sol plat et transport dans toutes les directions mais plus efficacement vers l'aval sur les pentes.**
- 4 - Bruit du choc des gouttes sur les matériaux résistants (ex. : sur les tôles).**

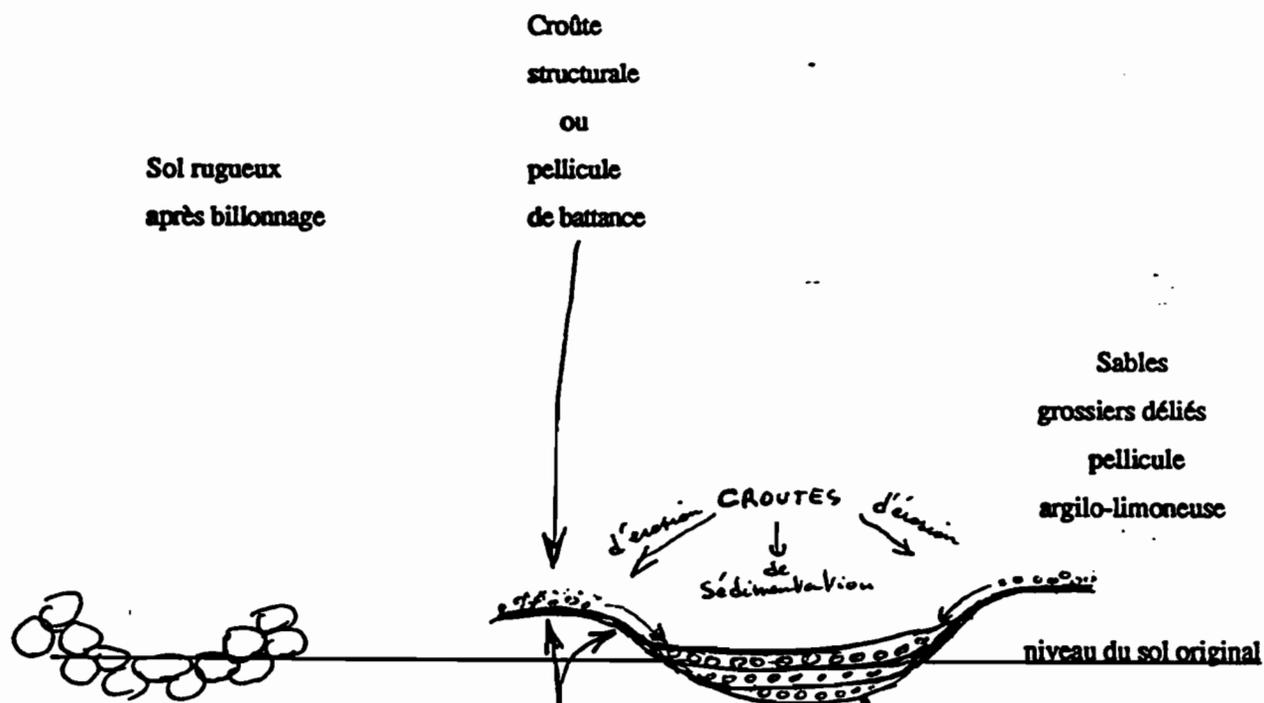
A cette énergie des pluies est opposée la cohésion ou la résistance d'un matériau terreux. Celui-ci peut être déjà plus ou moins dégradé :

- 1 - Par éclatement au contact des gouttes sur les mottes desséchées.**
- 2 - Par humectation suivie de dessiccation qui donne des petites mottes fissurées.**
- 3 - Par tassement par les pneus ou par les rouleaux qui donnent des petites mottes éclatées.**
- 4 - Par dispersion, soit par salinisation ou par la présence de sodium échangeable.**

Le matériau sol peut être plus ou moins résistant de par la présence de cailloux ou de gravier ou bien en fonction du pourcentage de limon et sable fin (10 à 100 microns) de matières organiques et d'argile, la présence de carbonate, de fer et d'alumine libre, en fonction également de la stabilité structurale et de la perméabilité du profil (voir érodibilité des sols).

Le déplacement des particules se fait d'abord par effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. La battance des gouttes de pluies envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions mais, sur les pente, la distance parcourue vers l'amont est inférieure à la distance parcourue vers l'aval, si bien que dans l'ensemble, les particules migrent par sauts vers l'aval. Les expériences de Christoï (1960) à la station I.R.H.O. de Niangoloko, au sud du Burkina Faso ont montré que les particules de sol peuvent sauter jusqu'à 50 cm de haut et jusqu'à plus de 2 m de distance durant les gros orages de fin de saison sèche. Ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbe, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde. Au-delà de 25 cm/seconde, le ruissellement, non seulement peut transporter des sédiments fins, mais

FIG. 4.1 : SCHEMA DES CROUTES D'EROSION, DES CROUTES STRUCTURALES ET DES CROUTES SEDIMENTAIRES



	sol labouré	croûte de battance/structurales ou d'érosion	Croûte de sédimentation
Infiltration finale	> 100 mm/h	5 à 15 mm/h	1 - 5 mm/heure
Epaisseur		1 à 2 mm	5 - 100 mm

aussi attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées où la vitesse augmente rapidement. On passe alors à l'érosion linéaire (griffes, rigoles et ravines). Voir les courbes de Hjulström (Fig. 5).

Sédimentation : c'est au court de la battance des pluies que des particules ou même des agrégats (en particulier si des grosses gouttes d'orage tombent sur des mottes sèches) vont quitter les mottes pour sédimenter dans les creux et y former des croûtes de sédimentation à très faible capacité d'infiltration (voir schéma précédent).

L'érosion en nappe observée sur parcelle d'érosion dépend à la fois :

- de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement (I_{\max} en 15 mn sur pentes fortes ou I_{\max} en 30 minutes sur les pentes moyennes),
- de l'énergie des pluies ($E C$) qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- de la durée des pluies ou de l'humidité avant les pluies.

Voir tableau 4.1

Hudson en Rhodésie (actuellement Zimbabwe) puis Elwell & Stocking sur des sols ferrallitiques bien structurés (oxisols) trouvent de meilleures relations entre l'érosion et l'énergie des pluies au-dessus d'un certain seuil d'intensité ($I > 25$ mm/h. $E = K E$ si $I > 25$ mm/h). Ceci signifie que seules les pluies intenses provoquent de l'érosion. On peut cependant penser que toutes les pluies laissent une trace en dégradant la surface du sol. Même si toutes les pluies ne ruissellent pas, elles favorisent la naissance de croûtes peu perméables et accélèrent le ruissellement lors des pluies suivantes.

S'il existe effectivement une intensité limite des pluies, celle-ci varie en fonction du degré d'humectation du sol et de la dégradation de la surface du sol avant le début de la pluie (voir travaux Boiffin, 1983 ; Raheliasoa, 1986 ; Lafforgue, 1978 ; Casenave et Valentin, 1989). Certains chercheurs (Lal, 1976) pensent que l'intensité maximale instantanée, ou bien en 7 mn ou en 15 mn, est encore mieux corrélée avec l'érosion que l'intensité en 30 mn. Ceci peut être vrai localement (De Noni et Pourut en Equateur sur sol volcanique, 1985) mais pas forcément partout. Roose (1973) a montré sur les sols ferrallitiques sableux de Basse Côte d'Ivoire, que plus la durée de l'intensité maximale est importante, et plus le coefficient de régression est élevé. De son côté, Lal a montré que le vent pouvait augmenter l'énergie des gouttes de pluie : cependant il est difficile d'en tenir compte car on dispose rarement à la fois de l'intensité des pluies et de l'intensité du vent.

TABEAU 4.1 : Influence de l'époque, de l'intensité maximum en 30 minutes, et des pluies de la décade précédente (h 10 jours = indice d'humidité du sol) sur l'érosion et le ruissellement provoqués par des pluies de hauteur voisine sur un sol nu et un sol couvert.

Dates	Pluie		Ruissellement (%)		Erosion (kg/ha)		
	h (mm)	h 10 jours	Intensité		Sol nu	<i>Panicum</i>	
			Max 30'	Sol nu			<i>Panicum</i>
13/02/72	28	58 mm	33	47	0	548	0
18/03/72	33	1 mm	59	52	0,1	1 104	0
27/03/72	32	45 mm	23	26	0	327	0
21/05/72	34	20 mm	28	26	0	1 518	0
09/06/72	33	131 mm	35	48	32	3 833	21
11/06/72	34	164 mm	26	44	11	2 191	26
13/06/72	38	230 mm	37	63	22	3 264	31
02/07/72	32	212 mm	43	73	0,1	6 025	0,2
31/07/72	30	0 mm	15	9	0	412	0
19/10/72	31	88 mm	14	39	0,1	1 501	0,1
23/11/72	28	18 mm	43	71	0	1 827	0

Il est cependant intéressant d'étudier l'ampleur des phénomènes d'érosion en fonction des classes de hauteur de pluie. On a constaté à Adiopodoumé que durant la campagne 1965 (maïs billonné selon la pente) il n'y eut pas de ruissellement pour les pluies de hauteur inférieure à 15 mm, ni d'érosion sérieuse pour moins de 30 mm. Il a fallu au moins 30 mm pour observer un ruissellement à chaque pluie et plus de 90 mm pour constater à coup sûr des transports solides. Chaque parcelle caractérisée par la nature du sol mais aussi par la couverture végétale et les façons culturales ont ainsi des seuils de déclenchement au-dessous desquels ne se manifeste aucun phénomène d'érosion (Roose, 1973) : en fait ces seuils de hauteur de pluie recouvrent des seuils d'intensité.

Wischmeier et Smith ont combiné dans un seul indice d'érosivité (EI 30) l'énergie de chaque averse multiplié par l'intensité maximale en 30 mn (en mm/h). Cet indice tient bien compte des trois conditions exprimées plus haut : énergie, intensité de pointe et durée des pluies.

Comme le dépouillement du pluviogramme de chaque averse est une opération minutieuse et fastidieuse, comme par ailleurs on ne dispose pas toujours de toutes les informations nécessaires sur l'intensité des pluies, de nombreux auteurs ont tenté de simplifier l'estimation de l'indice d'érosivité des pluies.

En Afrique de l'Ouest, Charreau (1970) puis le C.T.F.T. (1975) ont trouvé des relations linéaires entre l'énergie cinétique et la hauteur des pluies, donc :

$$R' = (a + b H) \cdot I_{30}$$

$$\text{Lal au Nigeria : } R' = \text{hauteur de pluie} \times I_{\text{max}} \cdot 7'$$

En dépouillant 20 stations d'Afrique de l'Ouest, situées entre Séfa au Sénégal et Delli au Tchad et entre Abidjan en Basse Côte d'Ivoire et Allokoto au Niger près du désert, Roose (1973) a montré qu'il existait en Afrique occidentale une relation simple entre l'indice d'agressivité annuel moyen et la hauteur annuelle moyenne des pluies de la même période.

$$R A M = H A M \times \begin{array}{l} 0,5 + 0,05 \text{ en Afrique de l'Ouest,} \\ 0,6 \text{ en bordure de l'Océan sur 40 km,} \\ 0,3 \text{ à } 0,2 \text{ en montagne, au Cameroun (Roose), Rwanda, Burundi} \\ \text{et Madagascar (Sarrailh),} \\ 0,1 \text{ en zone méditerranéenne algérienne (Arabi, 1991), et moins de} \\ 0,01 \text{ en zone tempérée océanique.} \end{array}$$

D'où un schéma de répartition de l'indice R en unité américaine, moyen pour l'Afrique de l'Ouest et du Centre, basé simplement sur les isohyètes moyens modulés en fonction des différents coefficients. Ceci a été rendu possible du fait qu'il existe, dans cette région d'Afrique, de bonnes corrélations entre l'intensité maximale des pluies et la hauteur annuelle de fréquence 1/10 (Brunet-Moret, 1963-67, Roose, 1977).

Voir les courbes : intensité, durée en fonction de la hauteur des pluies.

Voir : figure 4.5

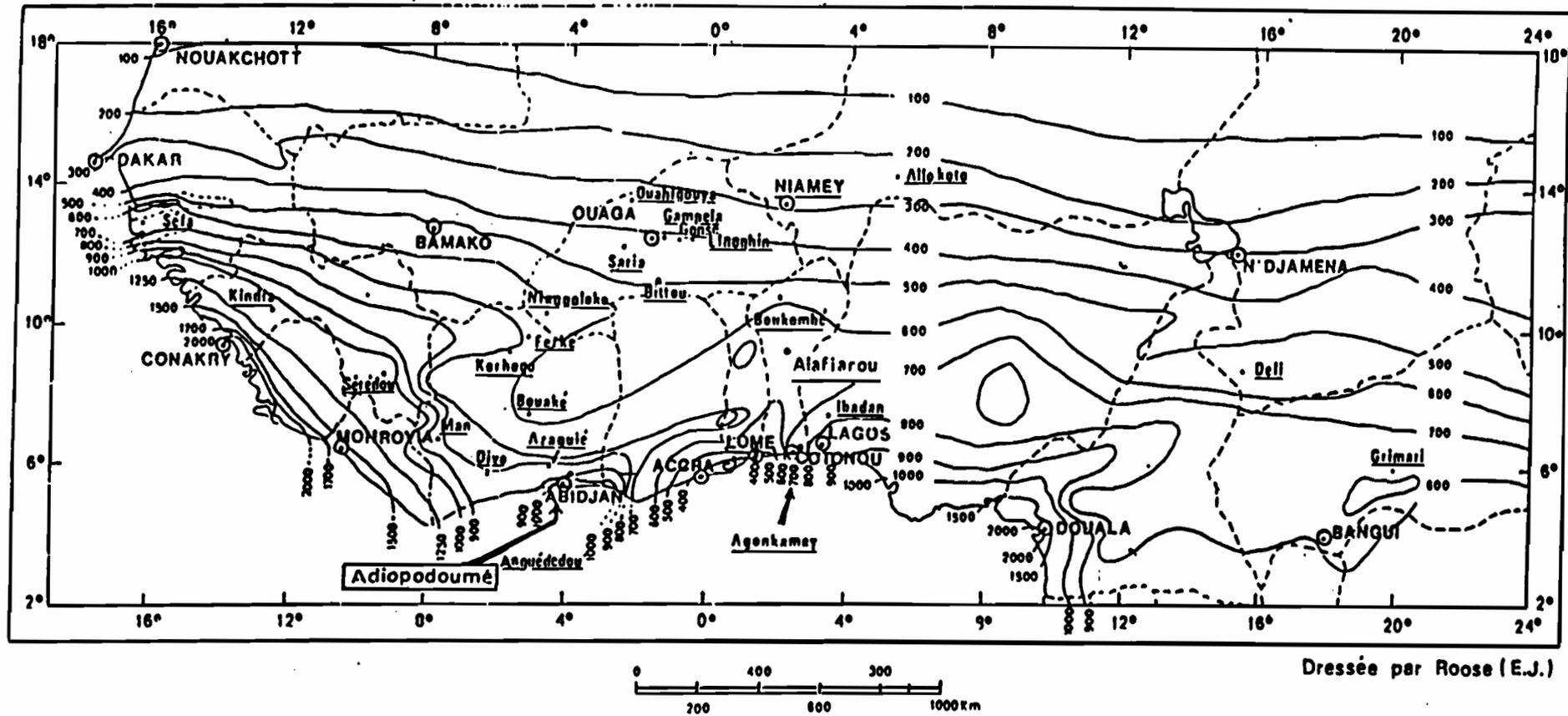


FIG. 4.3 : Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rusa de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre - Situation des parcelles d'érosion - D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.

FIG. 4.4 : RELATION ENTRE L'EROSIVITE DU CLIMAT "R" (unités USA) ET LA HAUTEUR DE PLUIE.

- Station Bouaké case d'érosion, 1961 à 1971 -

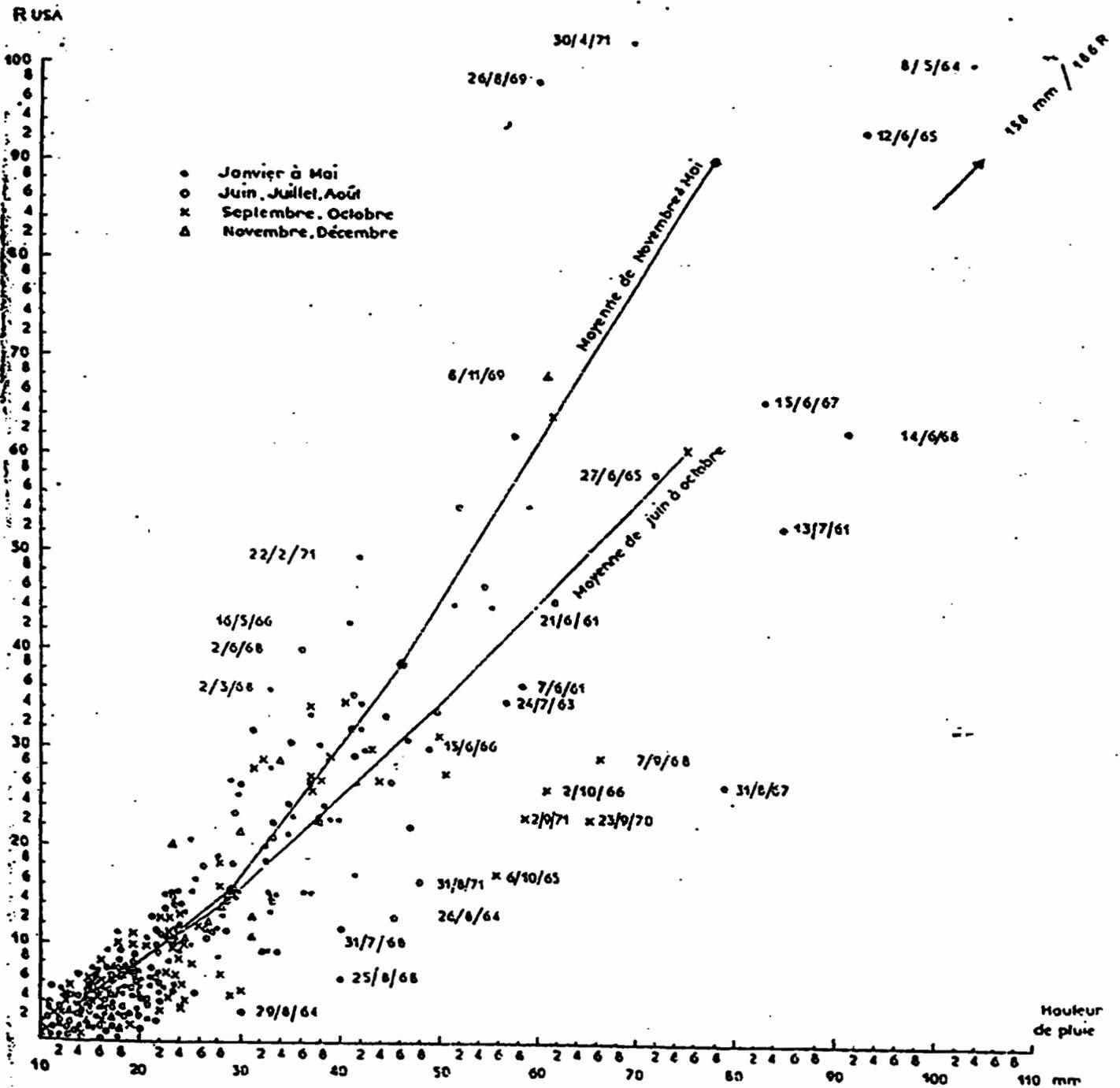
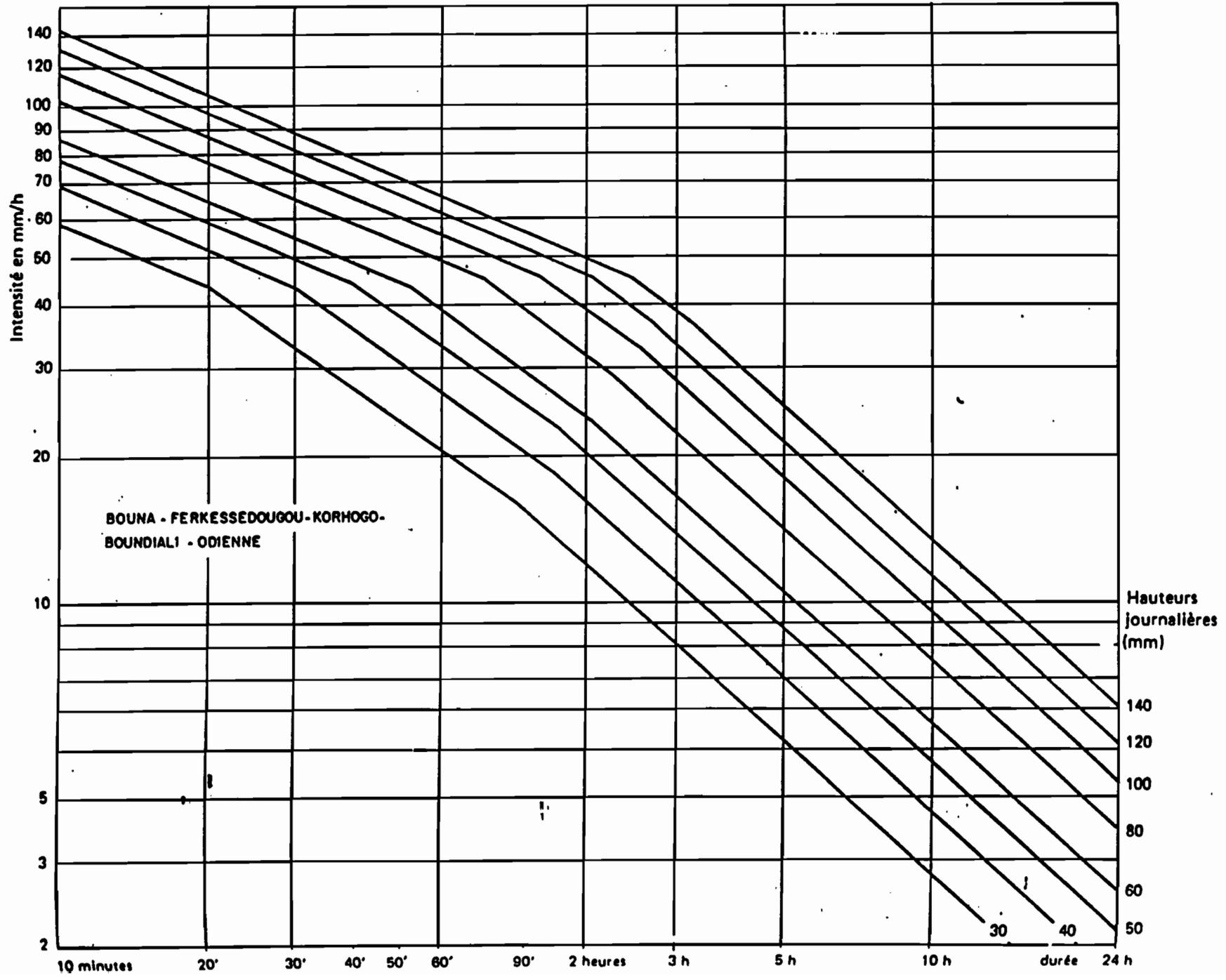


FIG. 4.5 : COURBES, INTENSITE / DUREES POUR DES AVERSES DE FREQUENCE
CONNUE EN CHAQUE POINT - D'après BRUNET-MORET (1967)



1.2.1.

Aux Etats-Unis, l'indice de Wischmeier varie de 20 à 650 unités (Wischmeier, 1960).

En Europe, l'indice varie de 20 à 150 : Pihan (1970), Bolline & col. en Belgique (1982).

En région méditerranéenne, R = 50 à 350. Masson, en Tunisie, Kalmani, au Maroc, Heusch au Maroc, Arabi, en Algérie, Pihan en France.

En zone tropicale sèche, R U.S.A = 100 à 450.

En zone tropicale humide, de 500 à 1200.

En zone hyper humide, au delà de 2000 (voir la carte des indices d'agressivité des pluies en Afrique de l'Ouest, Roose : 1977). (P. Blancaneaux en Guyane française, 1985)

Au Zimbabwe, Helwell et Stocking ont obtenu les valeurs suivantes :

Il faut cependant noter de graves écarts constatés entre l'érosion en nappe dans certaines régions et l'agressivité des pluies selon l'équation de Wischmeier. En effet les pluies agressives peuvent être des orages de début de saison des pluies comme en Afrique de l'Ouest ou bien des orages d'été comme en Europe ou encore de longues averses de fines pluies saturantes, peu énergétiques, tombant sur un sol détrempé en fin d'hiver ou début de printemps, comme en France ou en Algérie. Dans ce cas, l'érosion provenant de ces longues averses saturantes a pour origine bien plus l'énergie du ruissellement et donc de l'érosion linéaire, que l'énergie des gouttes de pluies elles-mêmes.

A l'échelle de bassins versants de plus de 2000 km², Frédéric Fournier en 1962 a montré que les transports solides étaient fonction de deux facteurs essentiellement. D'une part, la topographie et d'autre part, l'agressivité ou l'indice de continentalité des pluies. Cet indice (c) est égal au rapport entre le carré des pluies du mois le plus humide divisé par la pluie annuelle moyenne. Cet indice tel qu'il est présenté là ne concerne que les transports solides sur des grands bassins versants. Il ne peut pas être appliqué directement à l'érosion en nappe sur parcelle qui dépend beaucoup trop du couvert végétal et des techniques culturales. Par contre on a tenté d'estimer l'indice d'agressivité des pluies de Wischmeier à partir de la somme des indices mensuels de Fournier et on a pu trouver de bonnes corrélations régionales entre l'indice de Wischmeier et cet indice de Fournier modifié, mensualisé (FAO, 1980).

4.3 - LE MODELE EMPIRIQUE DE PERTE EN TERRE DE WISCHMEIER ET SMITH (U.S.L.E.)

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'états d'Amérique, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse¹. En 1958, Wischmeier, statisticien du service de conservation des sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 résultats annuels de mesures d'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

4.3.1. Analyse des principes du modèle.

Le modèle veut que l'érosion soit une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (le facteur R, qui est égal à l'énergie potentielle) que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend K, l'érodibilité du sol, S L, le facteur topographique, C le couvert végétal et les pratiques culturales, et P, les pratiques antiérosives. C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0. Ce modèle de prévision de l'érosion est constitué d'un ensemble de cinq sous-modèles :

- 1°) Tout d'abord, R, l'indice d'érosivité des pluies est égal à E, l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I 30 (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en mm par heure. Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée.
- 2°) L'érodibilité des sols, K, est fonction des matières organiques et de la texture des sols, de la perméabilité et de la structure du profil. Il varie de 70/100ème pour les sols les plus fragiles à 1/100ème. Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2^m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé, qui n'a plus reçu de matières organiques depuis trois ans.

¹ Plusieurs tentatives de synthèse de résultats avaient donné lieu à des modèles d'estimation de l'érosion en fonction de la pente (Zingg, 1940 ; Musgrave, 1950). Zingg 1940 $E = a \cdot S^{1.4} \cdot L^{1.6}$

- 3°) **S L**, le facteur topographique, dépend à la fois de la longueur de pente et de l'inclinaison de la pente. Il varie de 0,1 à 5 dans les situations les plus fréquentes de culture en Afrique de l'Ouest et peut atteindre 20 en montagne.
- 4°) **C**, le facteur couvert végétal est un simple rapport entre l'érosion sur sol nu et l'érosion observée sous un système de production. On confond dans le même facteur C, à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales qui y sont associées. Ce facteur varie de 1 sur sol nu à 1/1000ème sous forêt, 1/100 sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10 sous cultures sarclées.
- 5°) Enfin, **P**, est un facteur qui tient compte des pratiques purement antiérosives comme par exemple le labour en courbe de niveau ou le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau. Il varie entre 1 sur un sol nu sans aucun aménagement antiérosif à 1/10ème environ, lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage cloisonné.

Chacun de ces facteurs sera étudié en détail dans les paragraphes suivants. En pratique, pour définir les systèmes de production et les structures antiérosives à mettre en place dans une région, on détermine d'abord les risques érosifs des pluies, ensuite la valeur de l'érodibilité des sol, puis par des essais successifs, on adapte un facteur C en fonction des rotations que l'on souhaite obtenir et en fonction des techniques culturales, des pratiques antiérosives, puis on définit les longueurs de pente et les inclinaisons que nous devrions obtenir grâce à des structures antiérosives. C'est donc un modèle pratique qui convient à l'esprit d'ingénieur qui, avec peu de données, est obligé de chercher des solutions raisonnables à des problèmes pratiques, de façon moins empiriques que jusqu'alors.

4.3.2. Limites de ce modèle.

Première limite : Ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie et donc jamais à l'érosion linéaire ni à l'érosion en masse.

Deuxième limite : Il s'applique assez bien à des sols riches en kaolinite, des sols de type brun lessivés tempérés, des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, à l'exclusion des sols bruns tropicaux, des sols vertiques, des sols salés, des sols riches en argile gonflante qui manifestent très rapidement un ravinement important dû à leur faible capacité d'infiltration.

Troisième limite : Le type de paysage : ce modèle a été testé et vérifié dans des paysages de pénéplaines et de collines sur des pentes de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40 % où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies.

Quatrième limite : les types de pluies : les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans ce modèle ne sont valables que dans la plaine américaine. Elles ne sont plus valables en montagne mais on peut développer des sous-modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies, R.

Cinquième limite : ce modèle ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans. Elles ne sont donc pas valables à l'échelle de l'averse. Un modèle M.U.S.L.E. a été mis au point pour estimer les transports solides de chaque averse, qui ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais du volume ruisselé.

Sixième limite : Enfin une limite importante de ce modèle, c'est qu'il néglige certaines interactions entre les facteurs pour pouvoir distinguer plus facilement l'effet de chacun des facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente.

En conclusion, actuellement ce modèle sert de guide pratique pour les ingénieurs et les développeurs dans de très nombreux pays du monde. Il se développe encore actuellement dans de nombreux pays en développement. Mais ce modèle empirique ne satisfait pas toujours les scientifiques qui recherchent des modèles physiques qui s'appuient sur des processus élémentaires d'érosion et qui d'autre part, souhaitent pouvoir s'appuyer non pas sur des valeurs moyennes sur 20 ans mais sur les processus qui se passent au cours de chaque averse élémentaire. Il nous faut éviter de vouloir tirer plus que ce que les hypothèses de départ permettent et surtout que ce que les auteurs ont voulu mettre dans ce modèle empirique. De nombreux modèles à valeur régionale ont été mis en place tel que le SLEMSA au Zimbabwe. D'autres modèles s'appuient sur l'équation de Wischmeier, tel que EPIC ou sur des processus physiques tel que le modèle RILL and INTER RILL ou bien le nouveau modèle européen de prévision de l'érosion EUROSEL ou encore le modèle américain E.P.I.C. Il faut retenir que seul, ce modèle U.S.L.E. est actuellement pratiqué à très grande échelle dans de très nombreux pays. Il faudra encore attendre une bonne dizaine d'années avant de pouvoir utiliser les autres modèles de façon courante sur le terrain.

4.4 - L'ERODIBILITE DES SOLS

L'érodibilité d'un sol est sa résistance en tant que matériau plus ou moins cohérent à deux sources d'énergie. D'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, le cisaillement du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou les rigoles. Les premières études d'érodibilité des matériaux ont été effectuées par Hjulström dans des canaux (voir fig. 4.6). Le diagramme de Hjulström montre qu'il existe trois secteurs en fonction de la vitesse des eaux et du diamètre des particules des matériaux terreux. L'analyse du secteur érosion montre que les matériaux les plus fragiles ont une texture telle que le diamètre des particules est de l'ordre de 100 microns, c'est à dire des sables fins. Lorsque les matériaux terreux sont plus fins, se développe une cohésion par simple frottement entre les surfaces des argiles et lorsque les matériaux sont plus grossiers ils deviennent de plus en plus lourds et par conséquent, plus difficiles à transporter. Dans ce type d'essai il s'agit de la résistance en milieu humide aux forces de cisaillement par une rivière ou par un ruissellement.

Depuis longtemps, les pédologues ont constaté que les sols réagissaient de façon plus ou moins rapide à l'attaque des gouttes de pluie et à la dégradation de la structure. Toute une série de tests de laboratoire ou de terrain ont été mis en place pour tenter de définir la stabilité de la structure vis à vis de l'eau. Citons par exemple, les capsules de Ellison (1940) où des agrégats tamisés sont soumis à l'énergie des gouttes de pluie, le test de stabilité structurale de Hénin, où des agrégats sont plongés dans l'eau et tamisés sous l'eau, le test des gouttes d'eau où des mottes calibrées (30 gr) sont soumises à des gouttes de pluie tombant d'une hauteur déterminée (voir Riquier ou Fournier ou Pla Sentis) ou encore le test de dispersion de Ellison qui cherche à comparer la teneur en particules dispersées naturellement dans l'eau, avec ou sans dispersant.

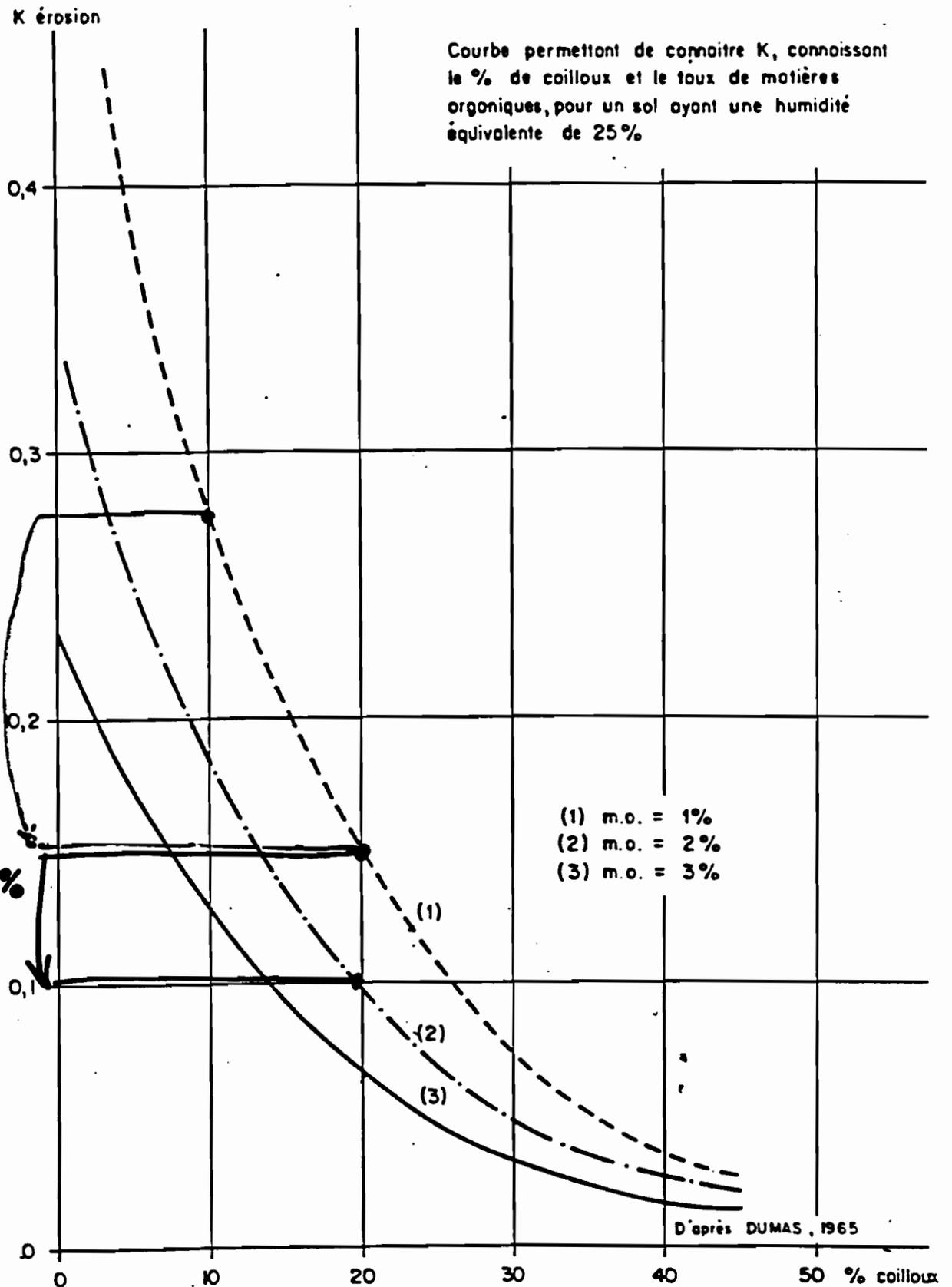
Les travaux de Quantin et Combeaux (1962) sur 10 parcelles d'érosion à Grimari en République Centrafricaine ont montré que lorsque l'indice d'instabilité de Hénin augmente, l'érosion augmente, la charge moyenne des eaux augmente, et les produits entraînés sont plus fins.

$$E(t/ha) = 4.9 \log_{10} IS - 0,5 \text{ où } R = 0,902$$

La charge solide moyenne en grammes par litre

$$C (g / litre) = 2.47 IS - 0,1 ; R = 0,904$$

Fig. 4.7: INFLUENCE DES TAUX DE CAILLOUX ET DE MATIERES ORGANIQUES SUR L'ERODIBILITE DES SOLS TUNISIENS (facteur K de Wischmeier)



Si cailloux double de 10 à 20%
 K ↓ de 0,13

Si m.o. de 1%
 K ↓ de 0,05

$$\log 1000 K = 3,4623 - 0,1695 X_2 - 0,0214 X_3 - 0,0282 X_1 \quad R^2 = 88\%$$

X_1 = taux cailloux en % de poids
 X_2 = matière organique
 X_3 = humidité équivalente

ERODIBILITÉ Le taux de cailloux est 3 fois + important que m.o.

Ces auteurs ont constaté que l'indice d'instabilité I_g varie avec les saisons, avec le couvert végétal et au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'époque de défrichement. Les sols tropicaux seraient donc moins sensibles vers la fin de la saison sèche lorsque le couvert végétal diminue et plus sensible sur des vieilles défriches : ceci a été vérifié sous coton au Nord Cameroun (Boli, Bep, Roose, 1991).

Pour se rapprocher des conditions naturelles, de nombreux auteurs ont soumis en laboratoire des populations d'agrégats prélevées dans les horizons labourés à des pluies simulées en vue de classer les sols selon leur résistance à l'érosion (voir Lal au Nigeria, Elwell au Zimbabwe, Yaïr au Canada, Moldenhauer aux Etats-Unis et bien d'autres...). Lors d'une étude comparative, Yaïr et De Ploey ont montré que selon les types de simulateur et les protocoles d'expérimentation, les sols se classaient de façons différentes. Récemment, Le Buissonnais a bien montré qu'il s'agissait en fait de différents processus de dégradation des sols qui interviennent en fonction des programmes de simulation de pluie.

De nombreux essais furent réalisés sur le terrain, sous pluie simulée. Par exemple, Meyer et Swanson aux Etats-Unis, Dumas (1965) en Tunisie, Pontanier au Cameroun et Tunisie, Roose, Lelong, Masson, Dartoux et Gril en France, Asseline, Roose, Valentin, Collinet en Afrique de l'Ouest, Asseline et Delhoume au Mexique. Travaillant sur des sols calcaires en Tunisie, Dumas, sur des parcelles de 50 m² a montré que l'érodibilité des sols est fonction du taux de cailloux, du taux de matières organiques, et de l'humidité équivalente du sol, laquelle est fonction de la texture (voir fig. 4.7). Sur cette figure et dans le cas des sols calcaires méditerranéens, on peut constater que l'augmentation de 1 % du taux de matières organiques ne réduit l'érodibilité du sol que de 5 %. Par contre, la présence de 10 % de cailloux dans l'horizon de surface va réduire l'érodibilité du sol de plus de 15 %. Au-delà de 40 % de cailloux, la réduction de l'érodibilité du sol diminue. Dans les paysages jeunes méditerranéens et calcaires, le pourcentage de cailloux est donc un signe d'une bonne résistance à l'érosion de ces sols.

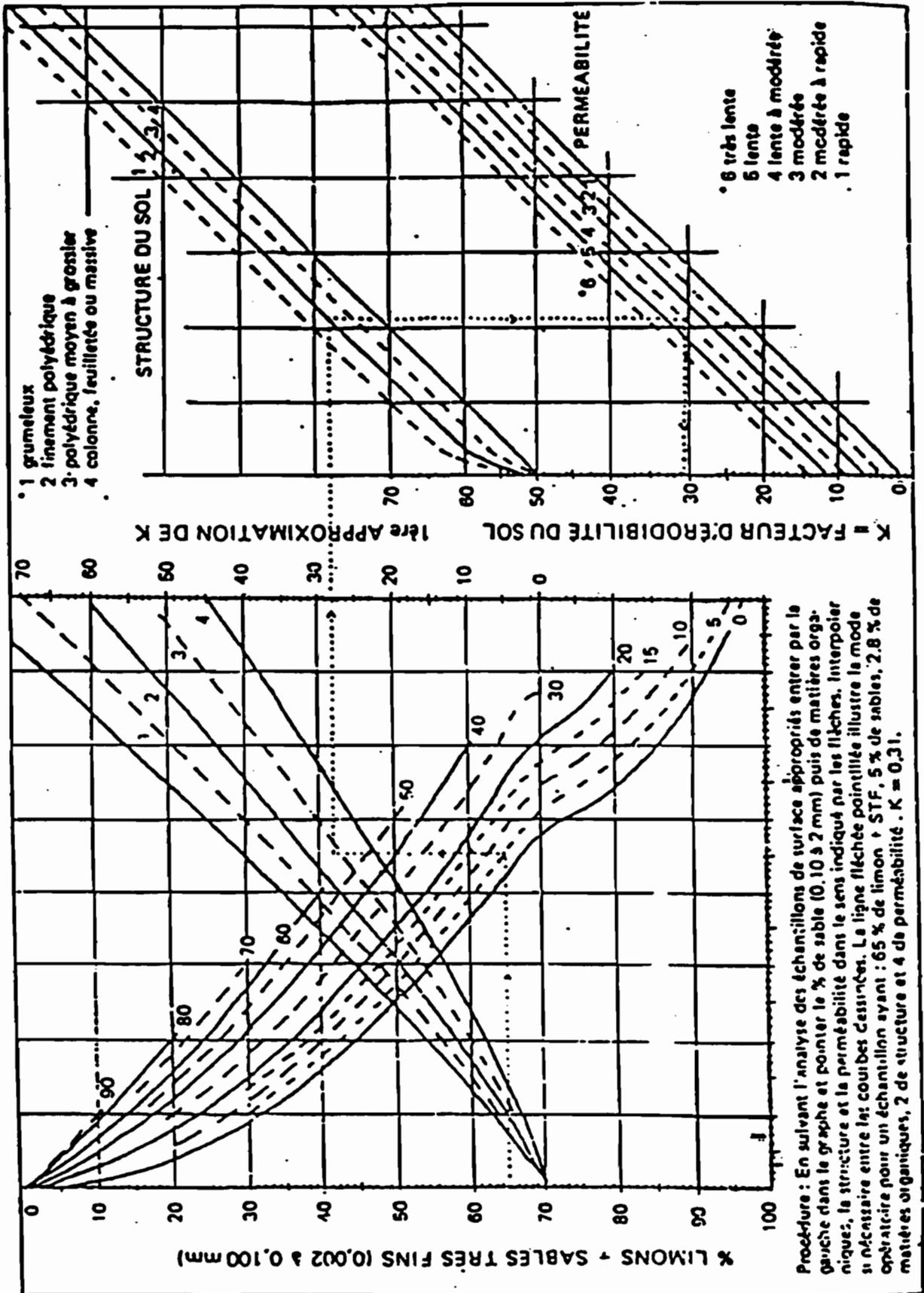
Aux Etats-Unis, Wischmeier et Schmith ont défini la parcelle nue standard de référence de 9 % de pente, 22 mètres de long travaillée dans le sens de la pente, sans enfouissement de matière organique depuis trois ans. Sur ces parcelles de référence, sous pluie naturelle et sous pluie simulée, Wischmeier et ses collaborateurs ont calculé des régressions multiples entre l'érodibilité des sols et 23 paramètres différents du sol. Après simplification, il s'avère que l'érodibilité dépend essentiellement du taux de matières organiques du sol, de la texture du sol, en particulier des sables de 100 à 2000 microns et des limons de 2 à 100 microns, et enfin est fonction du profil, la

structure de l'horizon de surface et sa perméabilité (voir fig. 4.8). Quelques années plus tard, Singer, en Californie, montre qu'il faut rajouter quelques facteurs supplémentaires dans le cas de ces sols californiens, en particulier, tenir compte du fer et de l'alumine libre, du type d'argile et de la salure des matériaux. Connaissant aujourd'hui la texture des horizons de surface, leur taux de matières organiques, leur salure, les teneurs de fer et alumine libre et le type d'argile et avec quelques observations sur le profil, on peut aujourd'hui avoir une première estimation de la résistance des sols à l'érosion en nappes et rigoles.

Comme ces paramètres ne sont pas pris en compte au plus haut niveau des classifications pédologiques, on ne trouve pas de relation stricte entre l'érodibilité et les différents types pédologiques existants. Cependant, l'indice K d'érodibilité varie aux Etats-Unis entre 0,70 pour les sols les plus fragiles, 0,30 pour les sols bruns lessivés, 0,02 pour les sols les plus résistants. En Afrique (Roose, 1980 ; Roose et Sarrailh, 1989) ont trouvé des valeurs variant entre 0,12 pour les sols ferrallitiques sur matériaux sablo-argileux, 0,15 pour les sols ferrallitiques sur granit, 0,20 pour les sols ferrallitiques sur schiste et jusqu'à 0,40 si les sols ferrallitiques sont recouverts de dépôts volcaniques. Nous avons trouvé 0,20 à 0,30 sur les sols ferrugineux tropicaux et 0,01 à 0,10 sur vertisols. Enfin 0,01 à 0,05 sur les sols gravillonnaires dès la surface. L'ensemble des mesures effectuées au simulateur de pluie, même sur des parcelles de 50 m² donne des valeurs inférieures aux mesures de longue durée sur parcelles sous pluies naturelles car sur ces dernières, se développent plus facilement des rigoles. En réalité, il n'existe pas un indice d'érodibilité par type de sol, mais cet indice évolue au cours du temps en fonction de l'humidité du sol, de sa rugosité, du couvert végétal, de la pente et des matières organiques.

Pour lutter contre l'érosion en cherchant à s'appuyer sur l'érodibilité des sols, nous disposons de deux moyens. Le premier est de choisir dans un paysage, les sols les plus résistants pour installer les cultures les moins couvrantes, les sols les plus fragiles devant être en permanence sous couverture végétale. Deuxième solution, c'est la gestion des matières organiques du sol. L'enfouissement des matières organiques dans l'ensemble de l'horizon travaillé aboutit rarement à une amélioration de 1 % du taux de matières organiques. Or cette amélioration de 1 % ne réduit le problème d'érosion que de 5 % (voir graphe de Dumas et le nomographe de Wischmeier). Il faut donc envisager de soit gérer la matière organique à la surface du sol, c'est le paillage, soit de ne l'enfouir que dans l'horizon tout à fait superficiel. On peut aussi apporter des marnes, c'est à dire des argiles et du carbonate de chaux, lesquels améliorent de 5 à 10 % la résistance du sol à l'agressivité des pluies.

FIG. 4.8. NOMOGAPHE PERMETTANT UNE EVALUATION RAPIDE DU FACTEUR K D'ERODIBILITE DES SOLS
 K D'ERODIBILITE DES SOLS
 D'après WISCMEIER, JOHNSON & CROSS, 1971



En conclusion, il est évident que l'on n'a pas encore réussi à résoudre le problème méthodologique d'estimation de la résistance des sols à l'érosion et son évolution au cours du temps. Actuellement, on cherche à classer les sols en fonction de différents tests adaptés à différents processus que l'on peut rencontrer dans différentes circonstances. Valentin montré que l'indice d'instabilité structurale de Hénin était en bonne relation avec la résistance du sol à l'érosion si les gouttes tombent sur sol sec, c'est à dire au début de la saison des pluies (C = éclatement des agrégats). Par contre, sur les sols humides de fin de saison des pluies, on obtient de meilleures corrélations entre les pertes en terre et les limites de liquidité d'Atterberg. De Ploey, sur des sols bruns lessivés d'Europe, a mis au point un indice semblable. Il faut également évaluer la capacité d'infiltration des eaux et la résistance du matériau au ravinement (force de cisaillement) dans le cas où les sols sont très sensibles au ruissellement (voir le cahier ORSTOM Pédologie 1989, n° 1 ; numéro spécial sur l'érodibilité des sols).

4.5 - LE FACTEUR TOPOGRAPHIQUE

4.5.1. Introduction

La pente influence puissamment l'importance de l'érosion mais l'existence d'érosion et de ruissellement intense sur des pentes douces (glacis de 2 % au Sahel ou sur les plateaux européens) indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente pour déclencher ce phénomène : l'action pluviale y suffit (Fauck, 1960 ; Fournier, 1967).

L'influence de la pente sur l'évolution des versants est bien connue des géomorphologues, au point que certains d'entre eux, caractérisent l'âge du paysage par l'inclinaison et la forme des pentes. De fortes pentes et des vallées encaissées se rencontrent dans un relief jeune comme celui des Alpes, tandis que dans un relief adulte ou sénile comme on en trouve sur le vieux continent africain, ce sont des plateaux, des collines à pentes douces et de vastes pénéplaines qui s'offrent aux regards.

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur.

4.5.2. La forme des versants.

Il est très délicat d'estimer l'influence de la forme concave, convexe, homogène ou gauchie d'une pente. Le facteur est trop souvent négligé ce qui explique pour une large part la divergence des résultats trouvés par les auteurs. En effet à mesure que les parcelles

d'érosion vieillissent et sont soumises à une forte érosion, elles deviennent de plus en plus concaves puisque la base de la parcelle reste fixe (= canal de ruissellement) et que le centre s'érode plus vite que le haut. D'où la nécessité de réajuster chaque année la pente des parcelles pour ne pas fausser les résultats par défaut. D'après Wischmeier (1974), à pente moyenne égale, une pente gauchie ou concave diminue les transports solides (par sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu. La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piégeages, des colluvions et des alluvions dans la vallée. En général, l'érosion sur versant est supérieure à l'érosion au transport solide dans la rivière : ce n'est pas le cas en zone méditerranéenne où la cause principale des transports solides est l'énergie et le volume du ruissellement (Heusch, 1973 : Arabi, Roose, 1989).

4.5.3. L'inclinaison de la pente (slope-steepness).

Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies sur des pentes de plus de 15 %. Zingg en 1940, Borst et Woodburn en 1949 ont montré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. Aux U.S.A. l'exposant est voisin de 1.4.

$$E = K S^{1,4}$$

Hudson et Jackson (1959) soulignent le fait qu'en Afrique Centrale, à cause de l'agressivité climatique, l'effet pente est exagéré par rapport à celui qu'on mesure en Amérique : ils obtiennent des exposants de l'ordre de 1.63 en moyenne sur des rotations complètes (y compris prairies et jachères) et jusqu'à 2,02 sur sols argileux et 2,17 sur sols sableux cultivés en maïs de façon extensive. Un exposant voisin de 2 semblerait plus adapté aux conditions africaines (Hudson, 1973).

A Séfa en Casamance, Roose (1967) observe en effet que l'érosion et le ruissellement croissent de façon très rapide pour de faibles variations de pente (0,5 %) (voir tableau 4.2)

Séfa en Sénégal, culture sarclée de 1955 à 1962, sol ferrugineux tropical lessivé à tâches et concrétions.

Pente	Erosion moyenne en t/ha/an	Ruissellement moyen annuel %
1.25%	5,0	7 %
1.50 %	8,6	22 %
2.00 %	12,0	30 %

En Côte d'Ivoire, sur des cultures vivrières entre 1964 et 1976, Roose obtient un exposant supérieur à 2 sur des cultures extensives peu couvrantes telles que : arachide, maïs et manioc.

Par contre, Lal (1975) trouve au Nigeria que l'érosion croît avec la pente selon une courbe exponentielle d'exposant 1.2 sur un sol ferrallitique remanié enrichi en graviers (alfisol) lorsque le sol est nu, mais que les pertes en terre sont indépendantes de la pente (de 1 à 15 %) si on laisse les résidus de culture en surface. Le ruissellement quant à lui dépendrait plus des propriétés hydrodynamiques du sol que de la pente elle-même.

Sur les parcelles d'érosion du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé en Basse Côte d'Ivoire, Roose a comparé sur une pente de 4, 7 et 20 % des sols nus à des sols couverts d'une plantation d'ananas, les résidus ayant été brûlés, enfouis ou laissés en surface. Roose constate la croissance de l'érosion plus que proportionnelle avec la pente mais il souligne l'existence de seuils de pentes en-dessous desquels les processus d'érosion sont faibles et au-dessus desquels l'érosion s'accélère brusquement. Par exemple lorsque les résidus sont enfouis, l'érosion reste très faible sur des pentes inférieures à 7 % mais dépassent largement la tolérance au-delà de 20 % des pentes. Si les résidus sont laissés à la surface du sol sous forme de paillage, même au-delà de 20 % l'érosion est négligeable. De même lors du second cycle de culture, les plantations eurent lieu en août de telle sorte que les plants d'ananas couvrent bien le sol avant les pluies du mois de juin suivant. On observe qu'il y eut très peu d'érosion quelle que soit la pente ou le mode de gestion des résidus de culture. Il y a donc des interactions entre l'effet pente, le couvert végétal et le mode de gestion des résidus de culture (voir le tableau 4.3 : ruissellement et érosion sous ananas en fonction des techniques culturales de gestion des résidus de cultures). En Afrique de l'Ouest, on a remarqué d'ailleurs que la végétation naturelle épargnée par les feux protège remarquablement le relief (Roose, 1971 ; Avenard et Roose, 1972). C'est ainsi qu'on peut observer en Basse Côte d'Ivoire des pentes de plus de 65 % sur un matériel ferrallitique sablo argileux protégé par la forêt dense secondaire. Si on défriche manuellement la forêt sans détruire le réseau racinaire qui donne cohésion à l'horizon humifère, le sol peut résister un à deux ans à l'agressivité des pluies. Mais lorsqu'on défriche mécaniquement la forêt ou la savane en décapant l'horizon humifère et fertile de surface, l'érosion et le ruissellement prennent des proportions catastrophiques d'autant plus vite que la pente est forte.

A Adiopodoumé, on dispose de trois parcelles sous forêt dense secondaire et de trois parcelles cultivées en 1966-1967 et maintenues en jachères nues labourées avant la saison des pluies de 1968 à 1972. Les pentes varient de 4.5 à 65 %. On a réuni au tableau 4.4. les moyennes des pertes en terre exprimées en t/ha/an et du ruissellement (en % des pluies annuelles) observé durant la période de 1956 à 1972 (Roose, 1973).

TABLEAU 4.4. : EROSION (t/ha/an) ET RUISSELLEMENT (KR %) EN FONCTION DES PENTES SOUS FORET, CULTURE ET SOL NU AU CENTRE ORSTOM D'ADIOPODOUME (Basse Côte d'Ivoire) d'après ROOSE (1973)

	Pente		Erosion t/ha/an			Ruissellement KR %		
	%	forêt	sol nu	culture	forêt	sol nu	culture	
Adiopodoumé 1956 - 1972	4,5	-	60	19	-	35	16	
Sol ferrallitique sur matériaux argilo-sableux	7	0,03	138	75	0,14	33	24	
tertiaires.....	23	0,1	570	195	0,6	24	24	
Pluie moyenne : 2 100 mm	65	1,0	-	-	0,7	-	-	

On constate que l'érosion augmente plus vite que la pente et que sa croissance est plus rapide sous culture que sur parcelle nue. Sous culture (manioc puis arachide), en effet, si on prend pour base l'érosion moyenne sur la pente de 4,5 % ($E = 18,8$ t/ha/an) on voit que les pertes en terre quadruplent lorsque la pente passe à 7 % (soit 1,5 fois plus forte) et quadruple encore lorsqu'elle s'élève à 23 % (pente 5,1 fois plus forte que la référence). Sur parcelle nue, la croissance de l'érosion est moins rapide, mais elle débute plus haut ($E = 60$ t/ha/an). Il semble bien que sur forte pente il y ait interaction entre les effets de la pente et la diminution du couvert végétal due aux carences hydriques et minérales dont souffrent les plantes du fait de l'érosion elle-même sur les fortes pentes. A côté de cet aspect quantitatif il faut noter que les formes d'érosion changent avec la pente et le profil du sol. Sur faible pente (4 %), l'énergie des gouttes de pluie disloque les agrégats et libère les particules fines : les suspensions stables de colloïdes peuvent migrer sur de grandes distances à travers le réseau hydrographique. Les sables, par contre, s'accumulent à la surface du sol à laquelle ils donnent une allure tigrée du fait de l'alternance de plages sombres (de sol à nu en relief) et de traînées de sable jaune dans les creux. La surface du sol est presque plane sur des pentes de 4 %. Mais dès qu'on atteint 7 % de pente, ces zones basses s'approfondissent en rigoles évasées et les

TABLEAU 4.3. RUISSELLEMENT (KR %) ET EROSION (t/ha) SUR SOL NU ET ANANAS EN FONCTION DES RESIDUS DE CULTURE

Adiopodoumé cases d'érosion sous pluies naturelles
 1975-1977 : 2 cycles de 16 mois, sol ferrallitique
 pentes 4 - 7 - 20 %

RUISSELLEMENT (KR % des pluies)

1er cycle : 3337 mm		Sol nu	Brûlis	Enfouis	Mulch	Moyenne/pente
Pluie 2e cycle : 1342 mm						
Pente	4 % / I	44,6	7,3	1,7	0,9	13,6
	II	(36,5)	(0,1)	(0)	(0)	(9,2)
	7 % / I	34,7	4,4	1	0	10,0
	II	(27,7)	(0,1)	(0)	(0)	(7,2)
20 % / I		29,3	7,5	3,4	0,1	10,3
	II	(20,0)	(0,1)	(1,5)	(0)	(5,6)
Moyenne/traitements		36,2 (28,1)	6,4 (0,6)	2,0 (0,6)	0,6 (0,03)	11,3 (7,3)

Notes - Le ruissellement n'augmente pas forcément avec la pente
 - Forte influence des résidus de culture si plantation à une date voisine des périodes critiques (cycles).

EROSION (t / ha)

		Sol nu	Brûlis	Enfouis	Mulch	Moyenne/pente
Pente	4 % / I	45	1,2	0,7	0,1	11,8
	II	2,8	0	0	0	6,9
	7 % / I	13,6	4,1	0,45	0	35,2
	II	66,0	0,03	0	0	16,5
20 % / I		410	69	33,2	1	128,3
	II	19,2	0,05	0,04	0	49,5
Moyenne/traitements		197 97	24,8 0,03	11,5 0,32	0,38 0	58,4 24,3

- Plantation en août ; les ananas couvrent bien le sol avant les pluies de juin - Peu d'érosion quelque soit le traitement.
 - Forte influence pente % sur érosion.

transports de sable s'organisent dans ces griffes : il apparaît des microfalaises et des microdemoiselles coiffées de faible hauteur (2 à 4 cm) qui montrent bien l'ampleur du décapage du sol par l'érosion en nappe. Enfin sur des pentes de plus de 20 %, le réseau d'évacuation du ruissellement et des particules de toutes tailles (jusqu'à 5 ou 10 mm de diamètre) se creusent et se hiérarchisent, si bien que la surface du sol devient extrêmement accidentée, du fait de rigoles profondes (5 à 20 cm) et des multiples figures burinées par la pluie et le ruissellement et protégées par divers objets tels que des graines, des racines, des feuilles, des poteries ou même de sols durcis ou encroûtés. Aux Etats-Unis, Smith et Wischmeier (1957) ont prouvé que sur des parcelles soumises aux pluies naturelles durant 17 ans et de pente de 3 à 18 %, une équation du second degré s'ajuste mieux que les fonctions logarythmiques en réalité très voisines proposées par les autres chercheurs américains. Cette équation est de la forme :

$E = \sqrt{L/100 (0.76 + 0.53 S + 0.076 S^2)}$ où E, l'érosion, s'exprime en t/ha, S en % et L en pied.

En ce qui concerne le ruissellement, Wischmeier (1966) montre qu'en général il augmente avec la pente sur de petites parcelles mais de façon variable en fonction de la rugosité de la surface du sol et de sa capacité à retenir l'eau (du type de culture et du niveau de saturation du sol avant la pluie).

FIG. 4.8

En Côte-d'Ivoire le ruissellement ne se comporte pas du tout de la même façon que l'érosion vis à vis de la pente. A Adiopodoumé sous culture, le coefficient de ruissellement atteint 16 % sur une pente de 4,5 %. Il se stabilise autour de 24 %, que les parcelles aient 7 ou 23 % de pente. Sur jachère nue, le ruissellement diminue franchement (35-33-24 %) lorsque la pente augmente de 4 à 7 et 23 % et ce phénomène se confirme au cours des années d'expérimentation. Cette diminution du ruissellement lorsque la pente augmente se constate non seulement pour les coefficients de ruissellement moyens mais aussi sur les coefficients maxima, donc lorsque le sol est saturé (K R max = 98-95-76 %). Ces tendances se sont confirmées les années suivantes (1975-1977) sous cultures d'ananas (voir tableau 4.4). Sur sol nu le ruissellement a baissé de 44 à 35 à 29 % lorsque la pente augmente de 4 à 7 et 20 %. Sous culture d'ananas, le ruissellement augmente légèrement ou même diminue selon le mode de gestion des résidus de culture. Ici également, il y a interaction entre l'effet de la pente et l'état de la surface du sol sur le ruissellement.

Ces phénomènes avaient déjà été signalés par Hudson (1957) en Rhodésie, où il constate que l'érosion croît de façon exponentielle avec la pente, mais que le ruissellement augmente d'abord rapidement (jusque vers 2 % de pente), puis se stabilise.

Fig. 4.8

FACTEUR TOPOGRAPHIQUE (d'après WISCHMEIER et SMITH, 1978)

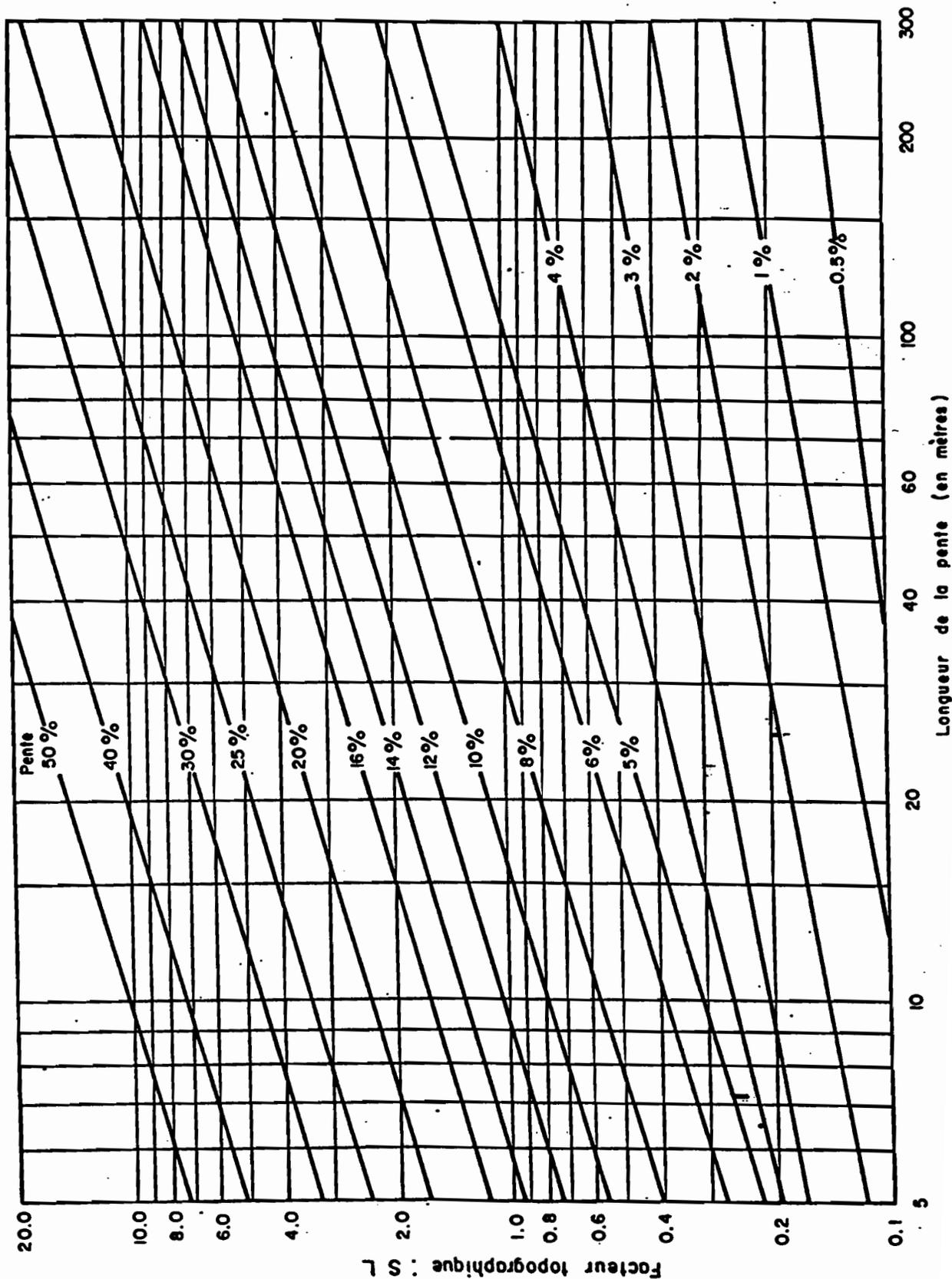


Fig 55d

Lal (1975) observe aussi au Nigeria que le ruissellement se stabilise au-dessus d'une certaine pente et dépend du type d'utilisation des résidus de la culture et du type de sol.

La diminution du coefficient de ruissellement sur sol nu pourrait s'expliquer au moins partiellement par les faits suivants (Roose, 1973) :

Lorsque la pente augmente, la surface inclinée offerte à la pluie est d'autant plus grande que la pente est forte. En d'autres termes, si on a mesuré la surface de la parcelle sur le terrain, sans tenir compte de sa projection verticale, il s'ensuit une erreur qui atteint 0,3 % pour une pente de 4,5 %, 0,7 % pour une pente de 7 % et 2 % pour une pente de 20 %.

- Lorsque la pente augmente, la forme de l'érosion change, elle burine dans le sol de multiples figures et augmente de ce fait sa surface donc le nombre de pores capables d'absorber de la pluie au moins dans la phase initiale.
- Lorsque la pente est faible, l'énergie du ruissellement n'est pas suffisante pour transporter au loin les particules sableuses relativement grossières. Lors d'une pluie, celles-ci vont être libérées par effet "splash" puis traînées lentement vers les parties basses. Au passage, elles peuvent être happées par les pores dont elles colmatent l'orifice. De plus, elles s'organisent horizontalement en microstrates ; c'est le phénomène de glaçage bien connu des agronomes. Sur pente forte au contraire, toutes les particules arrachées par l'énergie des pluies sont exportées de la parcelle et on peut penser que les pores restent ouverts en plus grand nombre car l'érosion décape considérablement la surface du sol. En tout cas on constate sur le terrain que les phénomènes d'encroûtement sont beaucoup plus lents sur pente forte et les effets d'un binage beaucoup plus durables que sur pente faible.
- Enfin, la pente hydraulique augmente avec la pente topographique, c'est à dire que les fortes pentes drainent plus rapidement que les pentes faibles.

Si l'érosion croît de façon exponentielle avec la pente et ceci malgré une diminution de ruissellement, c'est que sa charge solide totale (suspension + charge de fond) augmente substantiellement avec la pente.

Woodruff avait déjà démontré aux Etats-Unis en 1948 que si la contribution de l'énergie cinétique des gouttes de pluie est capitale à faible pente, elle devient secondaire par rapport à l'énergie du ruissellement au-delà de 16 % des pentes. Heusch (1969-1970 et 1971) quant à lui, a montré que sur les marnes du pré Rif au Maroc, que la position dans la toposéquence est quelquefois plus importante que l'inclinaison des pentes pour l'érosion et le ruissellement. Sur la toposéquence de vertisols

sur marne, l'érosion et le ruissellement mesurés augmentent au pied du versant là où la pente diminue. Ceci serait dû à des phénomènes de drainage obliques très intenses dans ces sols fissurés jusqu'au niveau d'altération de la roche marneuse peu perméable. Sur les fortes pentes qui coïncident avec les sommets des collines (pentes concaves), les pluies s'infiltrent directement jusqu'au niveau imperméable, puis drainent rapidement jusqu'en bas des versants (faibles pentes, où elles ressurgissent (Roose 1971) et c'est de là que démarrent les ravines qui montent à l'assaut des collines par érosion régressive. Il faut bien admettre aussi avec Heusch (1971) que plus la pente topographique est forte, plus la pente hydraulique est forte. Ce qui signifie que l'eau circule rapidement à l'intérieur du sol, ce qui doit lui permettre d'absorber à nouveau une certaine quantité d'eau avant la saturation de la porosité. Les sols sur forte pente et sommet de colline étant plus vite asséchés vont donc ruisseler moins d'eau en surface. Dans ces paysages marneux à forte pente, l'érosion se manifeste principalement par sapement de berges, par divagation des oueds, par ravinement et glissement de terrain (Heusch, 1971).

Des fonctionnements un peu semblables ont été décrits et étudiés sous les savanes soudaniennes du Centre-Ouest de Côte-d'Ivoire par une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM (projet Hyberbaïe). Les sols ferrallitiques rouges gravillonnaires de sommet de toposéquence sont résistants et perméables si bien qu'on y découvre rarement de traces importantes d'érosion. Sur les versants ferrugineux tropicaux déjà plus fragiles, naissent des petites ravines discontinues et dans les bas-fonds sableux hydromorphes naissent de plus grosses ravines qui progressent de façon remontante dans le paysage. Bien que le fonctionnement de ces séquences en région soudanaise soit très différent de celui des marnes en région méditerranéenne, la position topographique semble particulièrement importante dans l'explication du développement de l'érosion (réf. voir Journées Hydrol. 1990).

4.5.4. La longueur des pentes

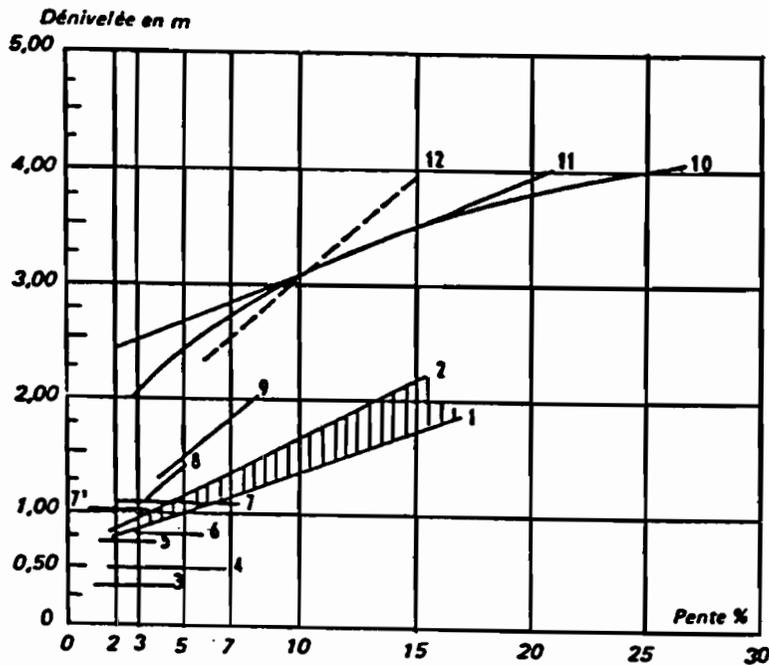
En théorie, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse, acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes. Ainsi, Zingg (1940) trouve que l'érosion croît de façon exponentielle (exposant : 0,6) avec la longueur de la pente. Hubson (1957-1973) estime qu'en région tropicale, une plus haute valeur de l'exposant est plus appropriée. Wischmeier et al. (1958), après avoir examiné 532 résultats annuels sur parcelles d'érosion, en concluent que les relations entre l'érosion et la longueur de pente varient plus d'une année à l'autre que d'un site à l'autre. L'importance de l'exposant (de 0.1 à 0.9) est fortement influencée par l'évolution du sol, la couverture végétale, l'utilisation des résidus de culture, etc... Finalement, en 1956, un groupe de

travail de l'Université de Purdue au Nebraska (USA) a décidé d'adopter pour l'usage courant sur le terrain, l'exposant 0.5 pour exprimer l'influence de la longueur de la pente sur les pertes en terre. L'influence de la longueur de pente sur le ruissellement est encore moins nette. Elle est tantôt positive, tantôt négative ou tantôt nulle. (Voir Fig. 4.9).

Voir FIG. 4.....

- En Afrique, à Séfa au Sénégal (Roose, 1967) furent comparées 3 parcelles de 1,25 % de pente dont l'une, de pente de longueur double des deux autres, portait en alternance les cultures des deux autres (= strip cropping ou culture alternée le long des pentes). En général, le ruissellement observé est plus faible sous cette parcelle longue (K R = 19 % par rapport à 21,8 %), tandis que l'érosion est supérieure (E = 6,08 par rapport à 5,55 t/ha/an) à celle observée sur les deux parcelles courtes : la différence de comportement n'est guère significative.
- A Agonkamé au Sud Bénin (Willaime, 1965 ; Verney et al., 1967) les conclusions sur deux parcelles voisines (pente = 4,5 %) ne confirment pas nettement non plus l'augmentation de l'érosion avec la longueur de pente. Sous fourré naturel en effet, érosion et ruissellement sont plus faibles sur la pente longue (60 m). Mais l'année suivante, sur sol défriché et dessouché, les ruissellements sont voisins tandis que l'érosion sur la parcelle courte (30 m) est nettement plus forte que sur la parcelle longue (E = 27,5 contre 17 t/ha/an). A Boukombé au Nord Bénin (Willaime, 1962), les observations effectuées sur trois parcelles cultivées en mil de 3,7 % de pente et de 21 x 32 x 41 m de longueur, montrent qu'il n'y a guère de différence de ruissellement (K R = 4 %) ni d'érosion (E = 0,8 - 1 et 0,7 t/ha) l'influence de la longueur de pente n'est donc ni très prononcée ni très constante.
- En Côte d'Ivoire, Valentin et Lafforgue ont simulé 12 pluies totalisant 652 mm pour un indice d'agressivité de 1161 sur 4 parcelles de 6 % de pente sur une ancienne prairie détruite. Le sol est ferrallitique sablo-argileux, tous les débris végétaux ont été soigneusement extirpés du terrain (voir tableau 4.5). Sous l'effet de la longueur de pente passant de 1 à 2 - 5 et 10 m, le ruissellement diminue de 27, 29, 23 à 20 % mais l'érosion augmente de 8, 8,6 à 11,3 et 13,7 t/ha/an. Ceci parce que la turbidité (charge solide des eaux) croît de 5 à 27 g/l. Pour ces faibles longueurs de pente, le ruissellement diminue tandis que l'érosion et la charge solide augmentent lorsque la pente augmente. Mais rien ne prouve que la croissance de l'érosion reste semblable

FIG. 4.... DIVERSES FORMULES LIANT L'ESPACEMENT ENTRE LES STRUCTURES ANTIÉROSIVES ET L'INCLINAISON DES PENTES (%) EN FONCTION DES PAYS D'APPLICATION.



Dénivelées de divers ouvrages

- 1 - Utilisation de la formule de RAMSER
 $H = 0,30 \left(2 \cdot \frac{P}{4} \right)$ au Congo et en Guinée
- 2 - Utilisation de la formule de RAMSER
 $H = 0,305 \left(2 \cdot \frac{P}{3} \right)$ en conditions moins dangereuses
- 3 - Sols très érodés ; écartement très réduit,
 Haute-Volta (Ouhigouya) Mali (Sikasso)
- 4 - Autre proposition pour Haute-Volta (Ouhigouya)
- 5 - Autre proposition pour Haute-Volta (Boulbi)
- 6 - 7 - 7b - 8 - Propositions diverses pour Boukombé
 (Dahomey)
- 7 bis - Banquettes de Dabou (Côte d'Ivoire)
 et haies isohypses
- 9 - Formule de RAMSER modifiée (Afrique du sud)
- 10 - Formule de SACCARDY (Algérie)
 $H^3 = 260 p \cdot 10$
- 11 - Formule de BUGÉAT (Tunisie)
 $H = 2,20 \cdot 8 p$
- 12 - Formule de l'État de Washington (U.S.A.)
 $H = 0,305 \left(0,55 \cdot \frac{P}{1,7} \right)$

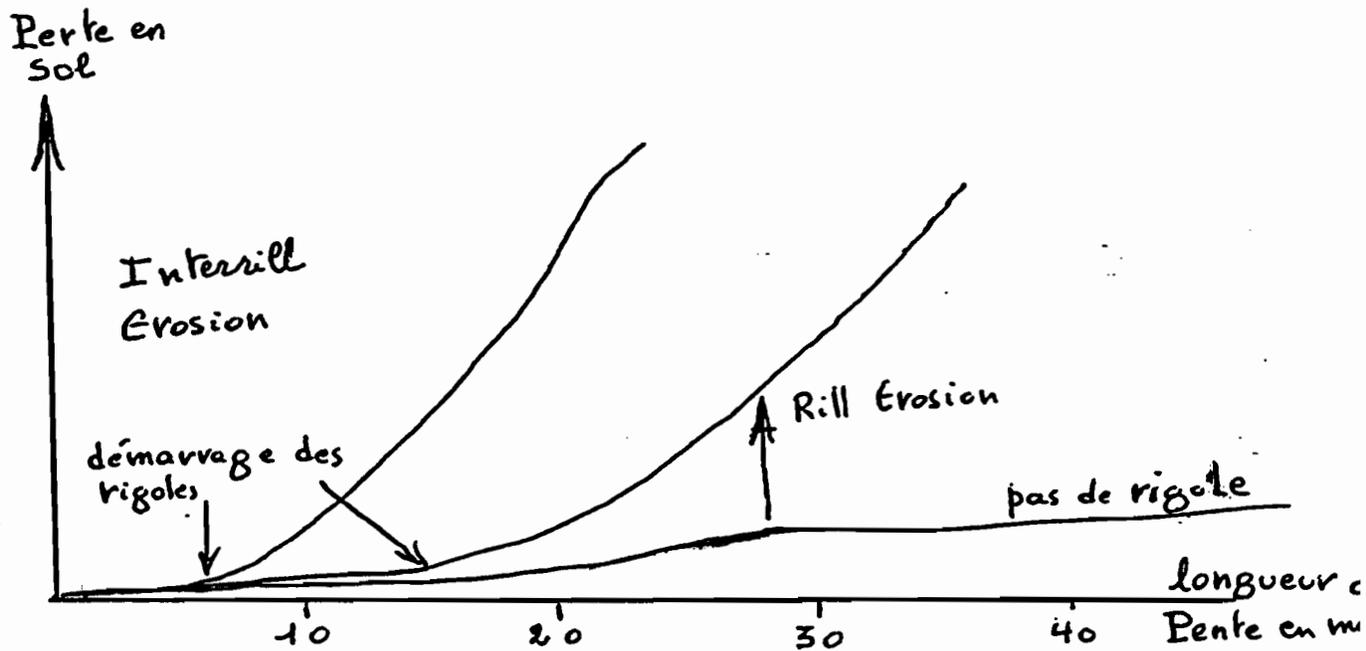
d'après Combeau, 1962.

lorsque la longueur de pente dépasse des valeurs de 50, 100 ou 150 m. Aux Etats-Unis, Meyer, Decoursay et Romkens ... étudièrent l'effet de la longueur de pente en trois sites plus ou moins sensibles à l'érosion en rigoles. Ils ont montré que l'effet de la longueur de pente se fait sentir après une distance plus ou moins longue et que la croissance de l'érosion peut être plus ou moins rapide en fonction de la sensibilité à l'érosion en rigoles de ces sols. On trouve encore ici une interaction entre l'effet de la longueur de pente et la sensibilité du matériau à l'érosion en rigoles (fig. 4.10). L'équation de Ramser qui est prévue pour décider de l'écartement entre les structures antiérosives est donc tout à fait incomplète car cette équation ne tient compte que de l'inclinaison de la pente en %. Les travaux précédents ayant donc montré que l'effet de la longueur de pente est très variable en fonction des états de surface et en fonction des types de sol, que l'effet de la pente n'est pas forcément très élevé. Il nous semble quant à nous, peu souhaitable de développer des modèles tenant compte de la longueur de pente, mais bien d'observer sur le terrain la naissance des rigoles dans les champs et ensuite de proposer aux gestionnaires de terres des méthodes de cloisonnement des structures antiérosives cloisonnant le paysage à des distances raisonnables d'un point de vue technique et acceptables d'un point de vue économique pour le paysan.

Cette incertitude sur l'influence de la longueur de pente sur les phénomènes d'érosion en nappes et rigoles, remet en cause la généralisation de l'usage des techniques antiérosives du type des terrasses, banquettes et fossés de diversion qui sont trop souvent appliquées sans discernement sous des climats très variés. Si ces terrassements se justifient en milieu subdésertique où les pluies sont inférieures à 400 mm par an, il sont avantageusement remplacés par des méthodes biologiques dans les zones où la végétation peut couvrir le sol et intercepter les pluies (Roose, 1974). Du point de vue scientifique, ce facteur topographique et ses interactions multiples mériteraient d'être précisés car l'influence de la pente n'est pas indépendante du couvert végétal, des techniques culturales, du type de sol et probablement du climat (Roose, 1973 et 1975). Cependant, en attendant de disposer de données suffisantes on peut s'appuyer sur l'indice topographique de Wischmeier ou sur une équation exponentielle du type $SL = C \times L^{0.5} \times L^{1.2 \text{ à } 2}$ où C est un coefficient dépendant des conditions locales, en particulier du climat, L est la longueur de la pente en mètres et S est l'inclinaison de la pente en pourcentage. Elle devrait donner satisfaction dans la plupart des cas (Hudson, 1973 : Roose, 1975).

FIGURE 4.10. EFFET DE LA LONGUEUR DE PENTE EN TROIS SITES PLUS OU MOINS SENSIBLES A L'EROSION EN RIGOLES.

(Meyer, Decoursay, Romkens, 1976)



d'après Bergsma, 1986

La sensibilité à l'érosion en rigole (Rillability) peut être estimée par des mesures :

- résistance au cisaillement (shearing stress)
- le volume du ruissellement (overland flow)
- la variabilité au test de la goutte (drop test).

En effet, la stabilité structurale des mottes maintient une

- + forte rugosité
- + forte turbulence

donc une charge unitaire plus élevée

L'équation de Ramser est tout à fait incomplète car elle ne tient compte que de la pente en %.

En pratique sur le terrain, plutôt que d'appliquer aveuglément des modèles plus ou moins mis au point en d'autres circonstances physiques et humaines, il nous semble souhaitable de chercher un compromis entre l'observation sur le terrain de la distance à partir de laquelle se développe l'érosion en rigoles - et d'autre part, la fréquence des obstacles que le paysan peut accepter.

4.5.5. Conséquences pour la lutte antiérosive.

Pour lutter contre l'érosion en nappe et en rigole, on a vu qu'il était généralement plus efficace de réduire l'inclinaison de la pente plutôt que la longueur de pente. Cependant on constate sur les champs de grandes cultures qu'il est nécessaire de cloisonner le paysage par des structures linéaires, des microbarrages perméables, qui permettent de réduire l'énergie du ruissellement tout en favorisant l'évacuation de ceux-ci au bas de talus bien protégés. Ceci ne veut pas dire qu'il suffit d'établir des structures antiérosives pour réduire les effets néfastes de la longueur de pente, mais il faut faire jouer toutes les interactions au niveau des états de surface, en particulier favoriser la rugosité du sol et le couvert végétal sur les champs cultivés entre les structures perméables filtrantes. Ceux-ci vont réduire l'effet de la longueur de pente et de l'inclinaison de la pente sur l'érosion. Notons que l'effet de la longueur de pente sur l'érosion en nappe est faible car le ruissellement en nappe a une vitesse limitée par la rugosité du sol. Par contre, la longueur de pente peut avoir une incidence importante sur l'érosion en rigole.

4.6. EFFETS DU COUVERT VEGETAL

Pour arrêter l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes où les pluies sont les plus agressives de l'année, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité à la surface du sol. Cependant, il est difficile d'évoquer l'action protectrice d'un couvert végétal sans préciser les techniques culturales au sens le plus large, utilisées pour l'obtenir.

Parmi les facteurs conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisque l'érosion passe de un à plus de mille tonnes lorsque toutes choses étant égales, le couvert végétal d'une parcelle diminue de 100 % à 0 % (comparer les parcelles sous ananas et résidus de récoltes maintenus à la surface avec les parcelles nues du tableau 4...).

Le tableau 14 met en évidence l'existence de trois groupes de couverts végétaux :

1 - Les couverts complets toute l'année : la forêt dense, mais aussi les forêts secondaires arbustives, les savanes arborées non brûlées, les jachères naturelles, les prairies de plus d'un an, les cultures arbustives avec plantes de couverture ou de paillage. L'érosion est toujours négligeable sous ces couverts denses ($E = 0,01$ à 1.5 t/ha/an) et le ruissellement est très faible ($KR \% = 0,5$ à 5 % en moyenne, 10 à 25 % au maximum pour les averses exceptionnelles). L'érosion et le ruissellement sont généralement très faibles sous forêt ; quelques cas font cependant exception : une forêt sur une pente de 65 % sur des sables tertiaires près d'Abidjan et une parcelle de 20 % sur des sols issus de schistes à Azaguie, une parcelle forestière en Guyane sur des schistes Bonidoro (Blancaneaux et Ecerex, 1982) et une parcelle forestière en milieu hyperhumide du Gabon, étudiée par Collinet en 1973. Le ruissellement maximal observé dans ces conditions souvent très humides pour des averses unitaires peut dépasser 35 % sous forêt. Sur les pentes les plus répandues, il semble que les ruissellements soient nettement plus forts sur les sols ferrallitiques issus de schistes que sur ceux qui sont issus de granit ou de sédiments tertiaires. La forêt, avec sa frondaison dispersée sur plusieurs étages, les buissons et la litière de feuilles mortes, couvrent le sol toute l'année, le protègent contre l'énergie des gouttes de pluie. La mésofaune (termites et vers de terre) entretient une bonne porosité et la vitesse d'infiltration reste élevée tout au long de la saison des pluies. Seule peut intervenir la saturation du sol au-dessus d'un horizon relativement peu perméable, à faible macroporosité. C'est le cas de la base de la nappe graveleuse à Azaguie, mais aussi des sols à drainage latéral en Guyane. Des résultats semblables, c'est à dire très faible érosion et ruissellement, ont été observés sur trois parcelles couvertes de fourrés forestiers denses dégradés de la station d'Agonkamé, dans le sud de la République du Bénin (voir Volkof, Vernet et Wilhaine, 1965 à 1970, Roose, 1976). Comme en forêt, le ruissellement court entre le sol et la litière, il est continuellement freiné par les aspérités du sol et piégé par les trous laissés par les racines pourries et la faune. Sa trajectoire est discontinue et son volume réduit dans les séquences étudiées (Rougerie, 1960).

Sous les savanes ou les vieilles jachères protégées depuis quelques années, les ruissellements moyens ($Kram = 0,02$ à 5 %) et les ruissellements maxima ne sont guère plus élevés que sous forêt. Par contre, nous verrons plus loin que si les feux interviennent chaque année en particulier tardivement, les conditions sont radicalement différentes. Si les parcelles sont totalement protégées du pâturage et des feux, les hautes herbes et les buissons prospèrent, les jeunes semis d'arbres se multiplient, couvrent entièrement le terrain en deux à quatre ans, produisent une abondante litière qui absorbe totalement

Tableau 14
Erosion et ruissellement à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal,
des techniques culturales et de la pente
- 1956 à 1972 -

Couvert végétal et façons culturales	Erosion annuelle t/ha		Ruissellement annuel moyen %	Ruissellement maximum %
	Extrêmes	Moyenne		
Forêt secondaire (pente 23,3 %) -----	0,01 à 0,2	0,1	0,7	6* (12)**
Sol nu* pente { 4,5 -----	34 à 74	60	37	71 (98)
7 -----	69 à 150	138	33	66 (87)
20-23,3 -----	266 à 622	570	25	65 (73)

Plante de couverture ou fourragère (p = 7 %)				
. 1ère année				
- plantation hâtive, fort développement dès la 1ère année -----	0,1 à 1,9	0,5	4	25 (29)
<i>Pennisetum purpureum, Guatemala grass,</i> <i>Panicum maximum, Cynodon dactylon,</i> <i>Setaria</i>				
- plantation tardive, faible densité, faible développement 1ère année -----	23 à 89	40	20	62 (87)
<i>Crotalaria, Flemingia congesta, Mimosa</i> <i>invisa, Panicum maximum, Digitaria</i> <i>umfolozi, Centrosema, Tiftonia diversifolia</i> <i>Stylosanthes</i>				
. 2ème année				
- toutes les plantes de couverture - 2 ^d an.	0,05 à 0,7	0,3	1	8 (12)

Jachère naturelle (pente 4,5 %) -----	-	0,6	8	64

Caféier, palmier à huile ou cacaoyer (p = 7 %)				
- avec une bonne plante de couverture	0,01 à 0,5	0,3	2	8 (16)
- avec une plante de couverture peu développée -----	5 à 143	-	30	60 (87)

Banancier avec paillis (p = 7 %) -----	0,04 à 0,05	0,04	0,5	4

Ananas				
1ère année { à plat 7 %	8 à 20	12	14	51
butté 4,5 %	-	1,5	9	5
2e année -----	0,1 à 0,3	0,2	3	12

Manioc et igname (p = 7 %) { butté 1 ^e année	22 à 93	32	22	53 (82)
butté 2e année	-	2	7	24

Maïs 20 x 100 cm (p = 7 %) billonné dans le sens de la pente	(35) à 131	92	30	75 (86)

Arachide 20 x 40 cm à plat (p = 7 %)	59 à 120	82	27	73 (87)

* Le premier chiffre est le maximum probable chaque année par pluie unitaire.

** Le deuxième chiffre correspond à un événement exceptionnel de récurrence décennale.

l'énergie des gouttes de pluie et favorise l'activité de la faune, laquelle perfore les horizons superficiels.

Les essais sur les jachères de Saria au centre du plateau Mossi, mettent bien en lumière l'influence des pailles résiduelles laissées sur le sol depuis fin 1971 (voir tableau 4.16 de la thèse). En 1971, le ruissellement est très élevé ; il atteint 50 % sous les jachères, car la jeune jachère est encore peu couverte et la plus ancienne est pâturée de façon extensive. Au cours des deux années de protection intégrale, le ruissellement, évidemment l'érosion, se sont maintenus à un niveau très bas, à peine quelques pour cent de ruissellement. En avril 1974, avant les premiers orages, toutes les herbes et les feuilles sèches couvrant la surface des parcelles ont été ramassées. Les coefficients de ruissellement moyens et surtout maxima sont aussitôt remontés de plusieurs pour cent sans pour autant retrouver le niveau initial car les souches et les touffes d'herbes sont reparties vigoureusement dès les premières pluies.

2 - Les sols nus, les jachères nues ou pratiquement nues, durant les mois les plus agressifs.

L'érosion est alors d'autant plus considérable que la pente est forte. A Adiopodoumé, l'érosion passe de 60 à 138 et 570 t/ha/an en moyenne, si la pente augmente de 4 à 7 et 23 %) et le ruissellement est très abondant (KR moyen = 25 à 40 % et KR max = 70 à 90 %). En principe, un paysan ne laisse jamais son sol nu pendant la saison des pluies, il y fait pousser des récoltes. Mais il arrive qu'il soit amené à semer trop tard ses cultures, si bien que pendant les premiers mois de la saison des pluies, les sols sont dénudés et se comportent comme des parcelles nues. On constate alors que les parcelles cultivées tardivement développant une érosion qui est de l'ordre de 80 % de l'érosion mesurée sur parcelle nue.

3 - Les couverts incomplets au moins durant une partie de l'année

Ce sont les cultures vivrières ou industrielles, les plantes de couverture ou de culture fourragère implantées tardivement ou encore qui démarrent lentement. Les phénomènes d'érosion sont évidemment intermédiaires mais extrêmement dépendants de la précocité et de la densité de plantation, de la pente et des techniques culturales. On remarque facilement au tableau 14, que les cultures vivrières sont parmi les plantes les moins protectrices du sol. L'érosion sous manioc ou igname s'élève de 22 à 93 t/ha/an sur une pente de 7 %, tandis que sans sous-maïs et arachide elle varie de 35 à 131 t/ha/an. Ceci provient du fait qu'on n'a utilisé aucune technique antiérosive, que les dates de plantation furent tardives et les densités assez faibles, vu la pauvreté du sol. En tout cas,

le couvert n'a atteint 80 % de la surface cultivée qu'après deux à cinq mois, c'est à dire après l'époque des plus fortes pluies. Dans les champs paysans traditionnels, il n'en va pas de même car les paysans plantent souvent très tôt après les premières averses et presque toujours en associant plusieurs cultures dont les couverts se complètent et se succèdent dans le temps et dans l'espace. En culture intensive cependant, on ne peut prendre le risque de devoir recommencer les semis si des périodes sèches succèdent aux premiers orages. Les plantations se font donc nécessairement relativement tard après le labour mais celui-ci favorise un enracinement profond et une fertilisation adéquate permettrait d'augmenter les densités.

Du tableau 14, il ressort encore que l'érosion, et dans une moindre mesure le ruissellement, dépendent pour une large part de la proportion du sol non couverte par la végétation avant les grosses pluies. Il ne s'agit pas seulement de la matière verte produite sur un champ, mais de façon plus précise, de la projection verticale ou mieux, légèrement oblique du couvert sur le sol : lors de chutes des grosses pluies, est généralement inférieur à 25° sauf lors de certaines tornades où il peut atteindre 45°. Il dépend aussi de l'architecture des plantes : hauteur du feuillage au-dessus du sol, disposition en gouttière comme un entonnoir concentrant les eaux (ex. ananas et maïs) ou au contraire en parapluie dispersant les gouttes (ex. manioc).

Il existe très peu d'études générales sur la dynamique du couvert végétal et aucune technique valable pour mesurer tous les types de végétaux cultivés. On a donc utilisé différents procédés pour évaluer le couvert végétal (Roose, 1973) :

- le diamètre moyen du cercle couvert par les rosettes de l'arachide, la proportion de surface couverte du cercle circonscrit à une touffe de manioc (sur photo verticale),
- le nombre et la surface des feuilles du maïs,
- les surfaces géométriques simples, couvertes ou dénudées entre les lignes de *Stylosanthes* ou d'arachide ou dans la savane,
- les points quadrats (aiguilles touchant ou non le couvert) pour les graminées, les adventices, les résidus de cultures et l'ananas.

La figure 4 montre que la dynamique de la croissance du couvert végétal est très variable en fonction du type de plante mais aussi des techniques culturales (densité et date de plantation, fertilisation) et du climat (précipitations et éclaircissement). On comprend dès lors que si les fortes averses tombent un mois après la date de semis, l'érosion sera fonction du type de plantes tout autant que des techniques culturales. D'où la notion de plantes dégradantes ou plutôt protectrices, suivant la vitesse du recouvrement du sol par ces plantes, notion qui doit être tempérée par celles des techniques culturales

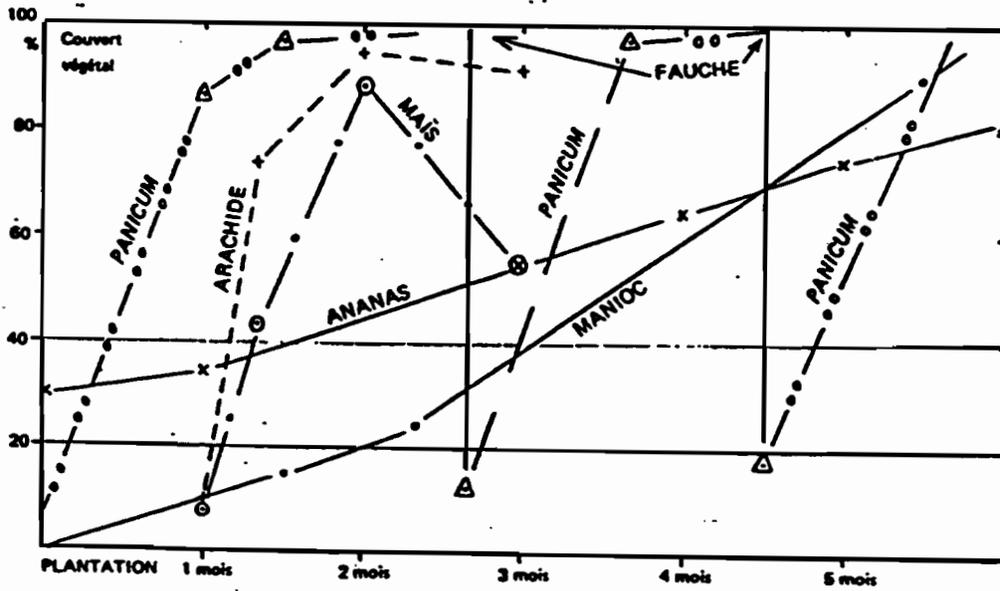


Fig. 4a Évolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année

- Adiopodoumé, cases d'érosion : 1966 à 1975 -

Tableau 16
Protection antiérosive de trois plantes fourragères après la fauche
- Adiopodoumé 1970-1972 -

	Pluie		<i>Cynodon aethiopicus</i>		<i>Stylosanthes guyanensis</i>		<i>Panicum maximum</i>		Sol nu	
	Hauteur mm	Agressivité RUSA	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha
3-11-1970	41,5	13,8	3,6	47	19,6	10	0	0	39	1 843
4-11-1970	Fauche									
5-11-1970	30,0	4,4	2,3	12	16,6	69	13,3	110	53	1 323
7-11-1970	22,0	7,3	2,6	2	14,9	87	25,0	175	74	1 111
22-09-1971	Fauche									
27-09-1971	33,5	18,5	1,9	9	15,2	188	3,3	175	32	1 542
15-07-1972	Fauche									
17-07-1972	65,0	42,3	3,4	10	6,1	16	21,8	335	77	9 710
Total après fauche	140,5	72,5	2,8	33	11	360	17	795	62	13 686
Couvert végétal après la fauche le 17-07-1972			60 à 80 %		42 %		8 à 14 %		0	

appropriées. En effet, une graminée protège généralement mieux le sol qu'une légumineuse ou qu'un manioc, encore qu'une plantation hâtive par rapport aux périodes plus pluvieuses, permet d'améliorer très nettement la valeur protectrice des plantes. Par exemple, le *Stylosanthes*, atteint le même pouvoir couvrant (95 %) que le *Panicum*, mais avec deux mois de retard. Certaines plantes sont dites dégradantes parce qu'elles couvrent lentement le sol. C'est le cas de l'ananas et du manioc qui ne gagnent que 10 à 20 % de couvert végétal par mois.

Certaines plantes comme le maïs, l'arachide et d'autres céréales, couvrent très mal le sol les deux premiers mois. Ce n'est qu'à la fin du troisième mois qu'elles dépassent 80 % de couverture du sol mais leur cycle étant assez court (de 4 mois), tout le reste de l'année, les sols nus sont soumis à la battance, à moins que les adventices ne couvrent le sol et n'absorbent toute l'énergie des gouttes de pluie. D'autres plantes sont considérées comme dégradantes alors que c'est simplement leur mode de culture qui est mal adapté ou qui couvre mal le sol. C'est le cas par exemple, du tabac que l'on plante à grand écartement de façon à avoir de très belles feuilles. On peut résoudre ce problème généralement en paillant les surfaces des cultures peu couvrantes. Il n'est évidemment pas possible d'utiliser du paillage sous cotonniers, autre plante de renommée dégradante. Cette fois, le cotonnier met au moins deux mois à couvrir le sol et par ailleurs, il ne laisse aucune trace de matière organique dans le sol après son passage puisque les feuilles sont broûtées, les tiges soigneusement arrachées et brûlées, y compris les racines. C'est donc à la fois le manque de couverture végétale et le déséquilibre du bilan organique qui entraîne la dégradation des sols sous ces différentes cultures. Par contre, le *Panicum maximum* et d'autres graminées en grosses touffes, arrivent à couvrir le sol au bout d'un mois.

Le tableau 16 montre l'importance de la protection antiérosive qu'offre la base des tiges et les racines superficielles de trois plantes fourragères après leur fauche.

On constate que même après la fauche, la protection par les cultures fourragères est considérable :

- le ruissellement est réduit de moitié et l'érosion à 1/17 et jusqu'à 1/415 de ce que l'on a observé sur la parcelle nue ;
- le *Cynodon* fauché reste bien plus efficace que le *Stylosanthes* (semé en lignes) et surtout que le *Panicum* qui vit en touffe. L'érosion est fonction de la surface du sol découverte après la fauche, soit 20 à 40 % sous *Cynodon*, 60 % sous *Stylosanthes* en ligne et près de 90 % sous *Panicum*.

TABLEAU 16 : PROTECTION ANTIEROSIVE DE TROIS PLANTES APRES LA FAUCHE. Adiopodoumé, 1970-1972.

Il est nécessaire de noter au tableau 14 que lorsque le couvert est incomplet, la variabilité des résultats est très importante. C'est une chance pour l'aménagiste de l'eau et des sols, car cette variabilité ne provient pas seulement de l'hétérogénéité des pluies et des imperfections de la méthode de mesure, mais surtout de la façon dont les cultures ont été mises en place et menées jusqu'à la récolte. On pourra donc jouer sur les techniques culturales, lesquelles agissent par voie biologique ou mécanique. La première méthode à laquelle il faut penser pour conserver l'eau et le sol, est la méthode biologique qui vise à intensifier la production sur les meilleures terres en augmentant le couvert végétal. La technique comporte une plantation hâtive et dense de variétés à forte croissance bien adaptées à l'écologie régionale, une préparation adéquate du sol, une fertilisation équilibrée, une production phytosanitaire suffisante, l'usage de plantes de couverture ou de paillage, des rotations et l'alternance de plantes couvrantes et de plantes sarclées.

Il est particulièrement important d'assurer la couverture du sol pendant la période des pluies les plus agressives, en particulier du 15 mai au 15 juillet à Adiopodoumé. Sur deux parcelles identiques de 7 % de pente, le retard d'un mois de la plantation d'un *Panicum maximum* a entraîné une augmentation de l'érosion de 1 à 89 t/ha et du ruissellement de 10 à 20 % pour les trois mois les plus agressifs de l'année.

Le choix d'une variété de manioc très vigoureuse et l'apport de fumier a réduit l'érosion de 93 à 30 t/ha/an sur des parcelles voisines.

En culture arbustive, l'implantation d'une bonne plante de couverture résoud généralement les problèmes d'érosion (voir les plantations de café, palmiers, cacao, hévéas, en Côte d'Ivoire). Voir le tableau 17.

TABLEAU 17 : Influence du développement du couvert d'une plante de couverture sous les cultures arbustives sur la protection antiérosive du sol.

Adiopodoumé 1961 et 1962, sur sols ferrallitiques sableux très désaturés, pente de 7 %.

Couverture végétale	Développement de la plante de couverture	E t/ha/an	Ruissellement moyen %	Ruissellement maximum %
1961 : Pluies 2289 mm				
P ₁ Caféier + couverture <i>Flemingia</i>	bon	0,4	2,6	8
P ₂ Palmier + couverture <i>Centrosema</i>	presque nul	143,2	2,1	87
P ₅ Caféier + couverture <i>Stylosanthes</i>	lent	5,2	1,8	75
1962 : Pluies 2773 mm				
P ₁ Caféier + <i>Flemingia</i> 2d an	complet	0,05	0,7	2
P ₂ Palmier + <i>Centrosema</i> 2d an	moyen	0,08	1,4	4

Influence de la hauteur du couvert végétal (voir la fig. 7.2.)

A la figure 7.2, on constate que l'érosion est fonction non seulement du couvert végétal, mais également de la hauteur du couvert végétal au-dessus du sol. Par exemple, lorsque le couvert végétal est de 100 % mais qu'il se trouve à 4 m de hauteur, l'érosion sera de l'ordre de 75 % d'une parcelle toute nue. Si le couvert est à deux mètres, l'érosion sera de l'ordre de 50 %. S'il est à 50 cm, l'érosion sera encore de l'ordre de 18 %. Par contre, au cas où l'on a une litière, l'érosion sera réduite à 3 %. Si on regarde la baisse de l'érosion en fonction du pourcentage du sol couvert par le mulch, on observe une baisse très rapide de l'érosion pour une surface couverte du sol relativement réduite. Par exemple, pour 10 % de sol couvert, l'érosion n'est plus que de 78 %, pour 20 %, l'érosion n'est plus que de 60 %, pour 50 % de sol couvert, l'érosion est réduite à 30 % de celle mesurée sur la parcelle nue témoin.

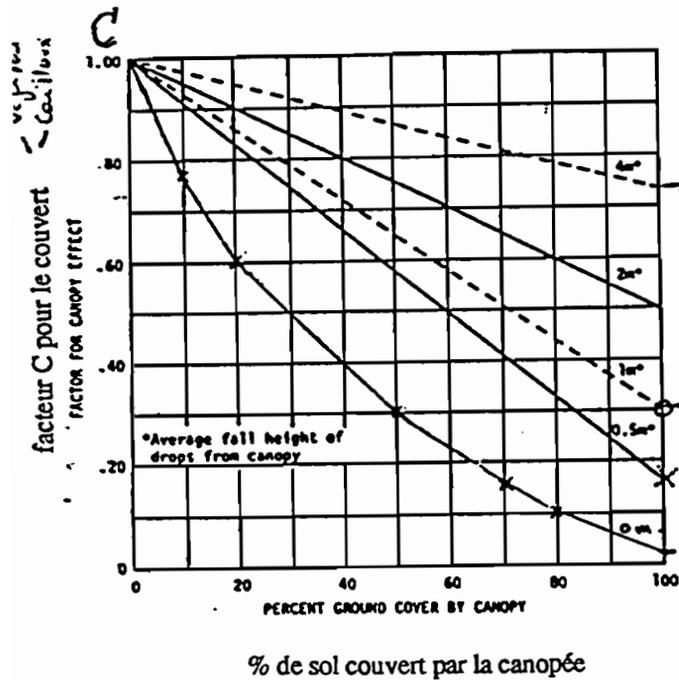
On constate donc que l'effet de la litière sur l'érosion est extrêmement rapide. Il n'est pas indispensable de couvrir tout le sol pour que le paillage soit intéressant pour lutter contre l'érosion. Si déjà, on couvre 20 %, on a réduit l'érosion à 60 % d'un sol nu. Si le paillage couvre de l'ordre de 40 %, on a réduit l'érosion à 40 % de son problème et si l'on a couvert le sol à 80 %, on a réduit l'érosion au 1/10 de celle que l'on peut trouver sur sol nu.

A la figure 7.2.B, on constate l'effet combiné d'une litière et d'une canopée. En effet, si l'on n'a aucune canopée, on retrouve la courbe précédente de l'effet de la litière sur l'érosion. Mais si en plus de la litière, on a 20, 40, 60, 80 ou 100 % de sol couvert par la canopée, on constate une augmentation progressive de la maîtrise de l'érosion. Ainsi, lorsque la litière est seule et couvre 20 %, l'érosion est de l'ordre de 60 %, mais si en plus de ces 20 % de litière, on a un couvert d'une canopée de 100 %, l'érosion ne sera plus que de 30 %. Si donc la litière au ras du sol est incomplète, on constate que la voûte foliaire peut avoir un effet important sur la réduction de l'érosion.

Enfin, l'alternance dans le temps (rotation) et dans l'espace de cultures qui protègent mal le sol (par exemple : maïs, arachide, tabac, manioc, igname) et de prairies temporaires ou permanentes, ou encore de bandes d'arrêt, permet de réduire l'érosion à l'échelle du bassin (voir le chapitre 4.8 : Quelques structures antiérosives ; voir les essais d'alternance à Sefa).

L'architecture des plantes peut également avoir un impact sur le développement du ravinement et de l'érosion. En effet, les arbres dont les feuilles canalisent les eaux vers le tronc, fonctionnent comme un entonnoir et ces eaux qui se rassemblent à la base du tronc, peuvent être à l'origine d'un cisaillement des billons qui vont drainer ensuite toutes les eaux contenues dans le sillon et provoquer un ravinement. C'est le cas en particulier, de l'ananas mais également, dans une moindre mesure, du

FIG. 7.2.A L'EROSION EST FONCTION DE LA HAUTEUR DU COUVERT VEGETAL AU-DESSUS DU SOL



Plus le couvert est élevé, moins il est efficace car les gouttes reprennent de l'énergie.

$C = 0,75$ Si sol couvert à 100 % par la canopée à 4 m

$C = 0,3$ Si sol couvert à 100 % par une canopée à 1 m

$C = 0,03$ si mulch sur le sol

FIG. 7.2.B EFFET COMBINÉ D'UN MULCH ET D'UNE CANOPEE LORSQUE LA CHUTE MOYENNE DES GOUTTES DE PLUIE NE DEPASSE PAS UN METRE.

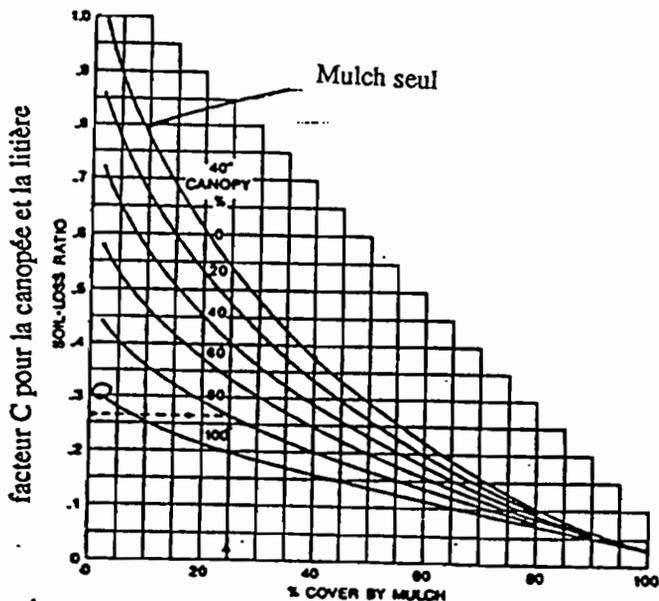


FIGURE 6.—Combined mulch and canopy effects when average fall distance of drops from canopy to the ground is about 40 inches (1 m).

- le mulch absorbe à la fois :

l'Energie $\left\{ \begin{array}{l} \text{des gouttes de pluie} \\ \text{du ruissellement} \end{array} \right.$

- Si le couvert est total (voisin de 100 %) :

-----> peu de différence

- Si le mulch est incomplet :

-----> effet important de la canopée

(voûte foliaire)

maïs. L'autre architecture est celle des plantes qui renvoient à l'extérieur les gouttes d'eau, donc ce sont des plantes "parapluie" qui dispersent ainsi leur énergie : le bananier et le manioc en sont des exemples.

Enfin, on constate l'influence des racines. Les racines superficielles fasciculées retiennent la surface de la terre ; par ailleurs, les racines pivotantes augmentent dans un premier temps, occupent les macropores des sols donc réduisent l'infiltration, mais dans un deuxième temps, pourrissent, laissent des tuyaux stabilisés par la matière organique et favorisent l'infiltration.

L'intensification de l'agriculture n'entraîne pas forcément une augmentation de la dégradation et de l'érosion des sols. Hudson en effet, a démontré que pour produire un sac de maïs, il provoquait 50 fois plus d'érosion dans un système extensif de culture du maïs qu'en plantant des maïs denses et en intensifiant leur exploitation. Ceci ne tient pas seulement au fait qu'il a fallu défricher des surfaces plus importantes pour produire la même quantité de maïs, mais aussi que sur des champs à faible densité, l'érosion est supérieure à celle des champs à forte densité. De même, les engrais peuvent avoir un impact significatif sur la protection contre l'érosion (Hudson, 1963)

TABLEAU

	K R %	Erosion en t/ha/an
Maïs sans engrais	14 %	18 t/ha/an
Maïs avec engrais	8 %	6,3 t/ha/an

Gestion des résidus de la culture... Rappelons l'essai situé au tableau 4.3 où la présence du couvert d'ananas et de résidus brûlés a réduit l'érosion de pratiquement 200 tonnes sur sol nu à 25 tonnes ; à 11 tonnes, si les résidus sont enfouis, mais si les résidus sont laissés en surface, à 0,4 tonnes. De même en moyenne, le ruissellement est passé de 36 % sur sol nu labouré à 6,4 % sur ananas avec résidus brûlés, 2 % si les résidus sont enfouis et 0,6 % si les résidus sont laissés en surface. Il semble donc évident que les résidus laissés à la surface du sol sont largement plus efficaces que ceux qui sont enfouis dans le sol pour améliorer la structure.

Sous forêt, l'érosion est généralement inférieure à 1 t/ha/an et le ruissellement est extrêmement réduit. Le ruissellement annuel moyen ne dépasse guère 2% des pluies annuelles tandis que le ruissellement maximum atteint 1 à 7 % lors des averses violentes tombant sur un sol déjà détrempé. Deux cas font exception : une pente de 65 % sur les sables tertiaires d'Adiopodoumé et une parcelle de 20 % sur des sols issus de schistes à

Azaguié. Le ruissellement maximal pour des averses unitaires peut dépasser 35 %. Sur les pentes les plus répandues, il semble que le ruissellement soit nettement plus fort sur les sols ferrallitiques issus de schistes que sur ceux qui sont issus de granit ou de sédiments tertiaires.

La forêt, avec sa frondaison dispersée sur plusieurs étages, les buissons et la litière de feuilles mortes, couvre le sol toute l'année et le protège contre l'énergie des gouttes de pluie. La mésofaune (surtout vers de terre et termites) entretient une bonne porosité et la vitesse d'infiltration reste élevée tout au long de la saison des pluies. Seule peut intervenir la saturation du sol au-dessus d'un horizon relativement peu perméable, à faible macroporosité : c'est le cas de la base de la nappe graveleuse à Azaguié. Des résultats semblables, c'est à dire faible érosion et ruissellement ont été observés sur trois parcelles couvertes de fourrés forestiers denses dégradés de la station d'Agonkamé, dans le Sud de la République du Bénin (voir Volkof, Vernet et Willaime, 1965 à 1970 ; Roose, 1976).

Comme en forêt, le ruissellement court entre le sol et la litière, il est continuellement freiné par les aspérités du sol et piégé par les trous laissés par les racines pourries et la faune, sa trajectoire est discontinue et son volume réduit dans les séquences étudiées.

Sous les savanes ou les vieilles jachères protégées depuis quelques années, les ruissellements moyens ($K_{ram} = 0,02$ à 5 %) et les ruissellements maxima ne sont guère plus élevés que sous forêt (Saria : 1971-74, Korhogo : 1967-75 : Roose, 1979 et 80).

Par contre, la situation est radicalement différente si des feux interviennent chaque année. L'exemple de Gonsé est significatif à cet égard (voir tableau 4.15). Il apparaît en effet une différence très nette de couverture du sol au cas où le feu traverse une parcelle.

Si le feu est précoce (un mois après la dernière pluie utile), il passe vite, brûle les parties aériennes desséchées, mais ne détruit ni les souches d'herbe ni les grosses branches d'arbres. Il élimine par contre les jeunes semis, la litière de feuilles mortes et bon nombre d'insectes et de revageurs.

Les feux tardifs comme on peut en voir dans les savanes soudaniennes et soudano sahéliennes au mois de mai juste avant les pluies sont catastrophiques. En effet, les herbes étant très sèches à cette époque, le feu s'attarde sur chaque souche d'herbe, détruit la moindre paille, les parties aériennes des buissons et parfois même les grands arbres. Le sol est pratiquement nu et restera très mal protégé pendant un an au moins. Les averses orageuses battent alors la surface du sol, forment une pellicule de battance très peu perméable qui donne naissance à d'abondantes nappes de ruissellement.

TABLEAU 4.15 - EFFET DU FEU DE BROUSSE SUR LE RUISSELLEMENT D'UNE PARCELLE (Gonse : 1967-1973)

Précipitations (mm)	Protection intégrale 674 et 799	Feux précoces 759 et 810	Feux tardifs 553 à 691
KRA M %	0,2	2,5	15
KRMAX %	1	10	50 à 70 %
Erosion kg/ha/an	40	140	400
Couvert végétal %	85 ↗ 95	50 ↗ 85	10 ↗ 55

TABLEAU 4.16 - Influence de la protection intégrale sur le ruissellement mesuré sous deux jachères* (SARIA) Burkina Faso. D'après Roose, Arrivets et Poulain, 1979.

ANNES		1971	1972	1973	1974
Précipitations	mm	602	724	672	714
Ruissellement :					
- sur jeune jachère	KRAM %	20	5	6	8
	KRAMX %	51	29	22	30
- sur vieille jachère	KRAM %	10	0,4	0,3	3
	KRMAX %	41	2	1	8
Erosion kg/ha :					
- sur jeune jachère		700	43	19	720 ^x
- sur vieille jachère		17	9	10	35*

* En 1974, avant les premiers orages, exportation de la litière et de toutes les pailles

Par contre, si la parcelle est totalement protégée du pâturage et des feux, les hautes herbes et les buissons prospèrent, les jeunes semis d'arbres se multiplient, couvrent entièrement le terrain en deux à quatre ans, produisent une abondante litière qui absorbe totalement l'énergie des gouttes de pluie et favorise l'activité de la faune, laquelle perfore les horizons superficiels.

Les essais sur les jachères de Saria au Centre du plateau Mossi, mettent bien en lumière l'influence des pailles résiduelles laissées sur le sol depuis fin 1971 (voir tableau 4.16). En 1971, le ruissellement est très élevé ; il atteint 40 et 50 % sur les jachères car la jeune jachère est encore peu couverte et la plus ancienne est pâturée de façon extensive. Au cours des deux années de protection intégrale, le ruissellement et l'érosion se sont maintenus à un niveau très bas ; à peine quelques % de ruissellement. En avril 1974, avant les premiers orages, toutes les herbes et les feuilles sèches couvrant la surface des parcelles ont été ramassées. Les coefficients de ruissellement moyens et surtout maxima sont aussitôt remontés de plusieurs pour cents sans pour autant retrouver le niveau initial car les souches d'herbes sont reparties vigoureusement dès les premières pluies.

Introduire ici photos et commentaire sur l'essai CTFT de Bouaké.

Effet de mode de gestion du feu sur la nature du couvert végétal.

Effet des touffes d'herbes

En l'absence de feu et de pâturage, l'infiltration sur une vieille jachère mise en protection intégrale redevient bonne après quelques années. En effet, si les tests d'infiltration au double anneau (Müntz) ont montré que l'infiltration est très faible entre les touffes d'herbes, sur les plages dénudées (infiltration = 1 à 20 mm/heure), elle est cinq à dix fois supérieure sous les touffes d'herbes (infiltration supérieure à 1 mm/h). Les termites et autres petits animaux y trouvent en effet un abri qui leur convient, y construisent des édifices très temporaires et creusent des galeries qui, jointes aux canalisations laissées par les racines pourries, favorisent l'infiltration (Roose, 1979). On conçoit dès lors, que plus les jeunes arbres croissent, plus elles couvrent la surface du sol, et dévient de leur trajectoire les gouttes de pluie pour les guider vers la base des touffes où elles peuvent s'infiltrer facilement. Il faut encore ajouter le rôle de frein, joué par les tiges des plantes, par les racines subaériennes et surtout par la litière sur les nappes ruisselantes. En diminuant la vitesse du ruissellement, on augmente le temps d'infiltration et aussi son volume. Ce freinage par les tiges des herbes est cependant plus efficace sur le piégeage de la charge solide que sur la réduction du volume ruisselé.

En conclusion, quelle que soit la pente, les techniques culturales, la fragilité du sol et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet (peu importe son architecture et sa nature botanique pourvu qu'il soit complet à 80 %) assure une excellente conservation de l'eau et du sol. Son influence prime celle de tous les autres facteurs. C'est donc aux méthodes biologiques favorisant ce couvert, qu'il faut s'adresser en priorité pour assumer l'économie de l'eau, améliorer l'infiltration et la production et évidemment, conserver le sol.

4.7. LES TECHNIQUES CULTURALES.

Il apparaît de plus en plus clairement que pour réduire le volume ruisselé ainsi que les pertes en terre, l'état de la surface du sol joue un rôle majeur.

Pour améliorer l'état de la surface du sol, il existe deux approches complémentaires. Nous venons de voir la première : il s'agit de couvrir le sol, de planter tôt et dense quitte à utiliser des engrais, et enfin de maintenir la surface du sol couverte par les résidus de culture.

La deuxième approche que nous allons développer dans ce paragraphe est le travail du sol. Il s'agit de maintenir une bonne rugosité à la surface du sol, d'augmenter l'aération et la macroporosité, d'améliorer l'enracinement tout en luttant contre les mauvaises herbes et en enfouissant les résidus organiques pour améliorer le statut organique du sol et la stabilité structurale. Enfin, la culture et le billonnage en courbes de niveau, si possibles cloisonnées, permettent de freiner ou d'annuler la vitesse du ruissellement à la surface du sol. Si ces techniques font appel à des moyens mécaniques pour réduire le ruissellement, il ne faut pas perdre de vue que le travail du sol favorise le développement des racines et par conséquent du couvert végétal : il s'agit donc de méthodes mécaniques et biologiques à la fois.

4.7.1. Effet du labour profond.

Des travaux préliminaires sur sol ferrugineux tropical à Gampela (Burkina Faso), (Biro, Galabert, Roose et Arrivets, 1968) ont montré que le travail du sol diminue temporairement le ruissellement et l'érosion mais qu'il augmente la détachabilité et donc à long terme, les risques d'érosion, même sur des pentes relativement faibles.

Au tableau 4.18, nous reportons l'effet d'un labour à la houe sur l'érosion au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (pente 7 %, sol ferrallitique très désaturé sableux). On constate sur ce tableau une augmentation de l'érosion et une diminution du ruissellement sur une parcelle nue labourée.

En effet, le labour augmente temporairement la porosité du matériau mais diminue sa cohésion. Au tableau 4.19, sont réunies les observations concernant l'érosion sous les pluies encadrant la date du labour (9 avril 1971) de trois parcelles nues de pente de 4 - 7 et 20 %.

Le ruissellement s'est arrêté pendant trois semaines où il a plu 87 mm. Il reprend ensuite brutalement sur faible pente dès que la surface est lissée mais beaucoup plus progressivement sur forte pente. Le labour a ralenti le ruissellement pendant 50 jours (correspondant à 170 mm de pluie).

L'érosion n'est guère mesurable tant que le ruissellement est nul. Il est cependant évident que la battance joue un rôle à courte distance puisque la surface du sol, de motteuse et ouverte au départ, devient lisse et fermée au bout de 4 à 6 semaines (effet splash sur les mottes et sédimentation dans les parties basses). Au bout de 50 jours l'érosion atteint un niveau exceptionnellement élevé, puis diminue au bout de 2 mois suite au tassement et à l'encroûtement de la surface du sol. Il semble que sur pente forte l'effet du labour se fasse sentir plus longtemps que sur pente faible ; mais, à la reprise du ruissellement, l'érosion redevient beaucoup plus intense sur pente forte à cause de l'énergie élevée du ruissellement.

La turbidité des eaux de ruissellement (charge fine en suspension) est faible durant la saison sèche (le sol est encroûté), mais augmente très brutalement lors des premières pluies ruisselantes après le labour (charge 10 à 100 fois plus forte) puis elle décroît lentement à mesure que se reforme une surface glacée et battue. En résumé, sur ce sol ferrallitique sableux, un labour à la houe sur 15 cm, lorsqu'il laisse la surface motteuse, peut absorber totalement les pluies, totalisant 45 à 80 mm et son action modératrice sur l'érosion et le ruissellement peut se faire sentir pendant 3 à 5 semaines (correspondant à 50 à 190 mm de pluie) sur parcelle nue.

Ces résultats, obtenus en Basse Côte-d'Ivoire sur sols ferrallitiques et parcelles nues, semblent défavorables à l'usage du labour puisque les bénéfices concernant l'infiltration ne durent qu'un mois et qu'au bout de l'année les pertes en terre sont plus importantes sur le sol labouré (plus 25 % que sur le sol tassé). En fait, il ne faut pas oublier l'interaction qui joue entre les effets sur le labour (amélioration temporaire de la porosité) et la croissance des plantes (meilleur enracinement = meilleure couverture végétale).

TABLEAU 4.19 - Influence d'un labour suivi d'un hersage sur le ruissellement (%), l'érosion (t/ha) et la turbidité (gr/m³) sur des parcelles nues.
Adiopodoumé ; campagne 1971 - (Roose, 1973)

	Pluies		Ruissellement			Erosion			Turbidité		
	Hauteur mm	Erosivité R	%			kg / ha			gr / m ³		
Pente.....			4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %
30-3 1971	31,0	30,5	<u>79,0</u>	<u>64,1</u>	<u>44,2</u>	<u>2494</u>	<u>4793</u>	<u>30284</u>	273	664	1225
6-4	36,0	17,4	48,7	53,6	12,1	1003	2250	4795	<u>23</u>	<u>47</u>	<u>110</u>
9-4	labour puis planage de toutes les parcelles terminé le 13/4										
10-4	37,0	16,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-4	5,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22-4	12,5	1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26-4	5,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-5	27,0	12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	17,0	8,1	<u>37,8</u>	<u>15,5</u>	<u>3,3</u>	946	145	383	<u>4281</u>	<u>5502</u>	<u>8562</u>
10-5	17,5	1,0	31,6	17,6	2,7	543	549	379	1492	1796	4320
15-5	24,0	12,2	37,8	20,3	6,4	878	676	2316	<u>624</u>	2719	2467
21-5	23,5	10,8	<u>53,8</u>	<u>30,1</u>	<u>6,3</u>	989	859	2031	678	1483	3992
29-5	35,0	17,3	46,9	34,8	<u>15,2</u>	<u>1708</u>	<u>3074</u>	<u>23278</u>	810	<u>784</u>	<u>968</u>

TABLEAU 4.18 - EFFET D'UN LABOUR A LA HOUE (Adiopodoumé, p = 7 %)

8 à 12/197	P = 605 mm	E t/ha	KR moyen %	KR max %
P3	Sol nu, plat, tassé	15,3	27	54
p2	Sol nu, labouré sur 15 cm à plat	26,6	11	48

On observe une augmentation de l'érosion malgré une diminution du ruissellement après travail du sol (ferrallitique sableux).

Un autre essai très instructif sur l'influence du travail du sol a été réalisé par l'IRAT dans les parcelles de Bouaké au Centre Côte d'Ivoire sur un sol ferrallitique remanié sableux, comportant un horizon gravillonnaire vers 30 cm de profondeur (Kalms, 1975).

On y a comparé pendant 4 ans, le comportement à la pluie d'un sol nu, gravillonnaire, soumis à quatre modes de préparation du sol effectué dans le sens de la pente, deux fois par an : labour à 25 cm à la charrue à soc (L), labour semblable suivi d'un pulvérisage léger (L + P), pulvérisage superficiel à 5 à 10 cm (P) et non travail du sol (O) (voir tableau 4.20).

TABLEAU 20 - REACTION A LA PLUIE EN FONCTION DU MODE DE PREPARATION D'UN SOL NU FERRALLITIQUE GRAVILLONNAIRE : CIRAD - BOUAKE (KALMS, 1975).

Année	Pluie		Ruissellement (% annuel) des pluies érosives				Erosion (t/ha/an)				Turbidité (mgr/l.)			
	h (mm)	RUSA	L	L+P	+	O	L	L+P	P	O	L	L+P	P	O
1971	1345	523	34	32	35	(41)	11,5	14,9	12,9	-	-	-	-	-
1+72	965	329	37	34	37	42	19,7	11,0	25,0	17,9	-	-	-	-
1973	959	352	35	40	47	49	17,6	9,3	48,6	41,1	690	730	680	210
1974	1121	464	31	31	36	45	12,2	11,2	43,8	51,9	580	340	570	260

On constate que le travail du sol (profond ou même superficiel) a amélioré l'infiltration des eaux de pluie : le ruissellement est toujours nettement plus fort sur le sol nu non travaillé, et le phénomène est encore plus marqué si on ne s'intéresse qu'aux pluies érosives survenues après le labour. L'érosion par contre, évolue au cours du temps, mais à partir de la troisième année, elle est nettement plus faible sur sol nu labouré et pulvérisé que sur sol nu travaillé superficiellement ou pas du tout. Par contre, le travail du sol augmente nettement la charge fine en suspension dans les eaux de ruissellement. Sur le terrain on peut observer en surface les graviers remontés par le labour (teneur en gravier : 10 à 13 % sans labour, 22 à 28 % avec labour). Sur ce sol ferrallitique gravillonnaire de Bouaké, le labour a donc augmenté l'infiltration et diminué l'érosion en remontant des graviers qui ont joué un rôle de mulch protecteur à la surface du sol.

Ces deux essais se sont déroulés sur des sols nus. Qu'advient-il lorsqu'on observe l'interaction entre l'effet du sol et le développement végétal ? Rappelons d'abord les résultats et les mesures d'érosion et ruissellement sous ananas en fonction des techniques culturales à Adiopodoumé sur des pentes de 4 - 7 et 20 % (voir tableau 4.3). Le ruissellement moyen sur sol nu s'est élevé à 36 %. Avec le couvert végétal de l'ananas et les résidus brûlés il est réduit à 6.4 %. Lorsque les résidus sont enfouis et que l'on constate une amélioration de la structure du sol, le ruissellement n'est plus que de 2 % et lorsque les résidus sont laissés à la surface du sol sous forme de paillage, on constate un ruissellement inférieur à 1 %. Dans ce dernier cas, sur un sol qui n'a pas été travaillé, on constate malgré tout une bonne infiltration grâce à l'effet du paillage. Au point de vue de l'érosion, sur sol nu on a observé une érosion de près de 200 tonnes, sur résidus brûlés, 25 tonnes. Lorsque les résidus sont laissés à la surface, 0,4 tonnes. On constate donc que le labour associé à la couverture de l'ananas réduit considérablement l'érosion, l'enfouissement des résidus améliore la structure du sol, favorise l'infiltration et réduit encore de 50 % l'érosion, mais le non travail du sol, associé cette fois à la couverture de ce sol par les résidus de culture, réduit le ruissellement et l'érosion à une part totalement négligeable. Au Nigeria (station IITA de Ibadan), Lal (1975) considère que les risques d'érosion sur des champs dénudés par le labour sont tels - suite à la dégradation de la structure à la surface du sol - qu'il préconise un travail minimum du sol réduit à la ligne de plantation tandis que les interlignes sont couverts des résidus de la culture précédente. Cette méthode de travail minimum du sol, combinée au paillage, pose certains problèmes de lutte contre les mauvaises herbes et de protection phytosanitaire, de telle sorte qu'il ne donne pas toujours les rendements les meilleurs lors des années correctement arrosées. Mais au cas où les pluies sont insuffisantes ou mal réparties, l'amélioration de l'infiltration, la limitation des pertes par érosion, le maintien de la structure à son niveau original, l'activité accrue de la mésofaune (surtout les vers de terre) et l'amélioration du régime thermique assure une production plus soutenue.

Par contre, sur les sols ferrugineux tropicaux sableux, des zones tropicales sèches du Sénégal, Charreau et Nicou (1972) ont montré que sans labour profond, les rendements diminuent de moitié car l'alimentation hydrique n'est pas correcte : le réseau racinaire n'est pas assez développé, les pluies s'infiltrent mal dans ces sols sensibles à la battance, ce qui retarde la date du semis. Charreau (1969) a observé qu'en enfouissant les matières organiques lors d'un labour grossier effectué en fin de cycle avant la saison sèche, on augmente la stabilité de la structure et l'infiltration : les problèmes d'érosion s'en trouvent réduits d'autant.

De nombreuses expérimentations effectuées au simulateur de pluie, de 1975 à ce jour par Asseline, Collinet, Lafforgue, Roose et Valentin confirment : l'amélioration très temporaire de l'infiltration par le labour : après une pluie totalisant 120 mm de hauteur, on ne trouve pratiquement plus trace de cette amélioration sur aucun des sols testés entre Abidjan et le centre du Burkina Faso :

- l'augmentation de la charge en suspension fine des eaux de ruissellement, après le travail du sol ;
- le rôle extrêmement bénéfique et durable sur la conservation de l'eau et du sol du couvert végétal et des résidus de cultures laissés à la surface du sol ;
- le rôle très efficace mais temporaire du billonnage cloisonné et des autres méthodes qui visent à augmenter la rugosité du sol (Lafforgue et Naah, 1976 ; Roose et Asseline, 1978 ; Collinet et Lafforgue, 1979 ; Collinet et Valentin, 1979).

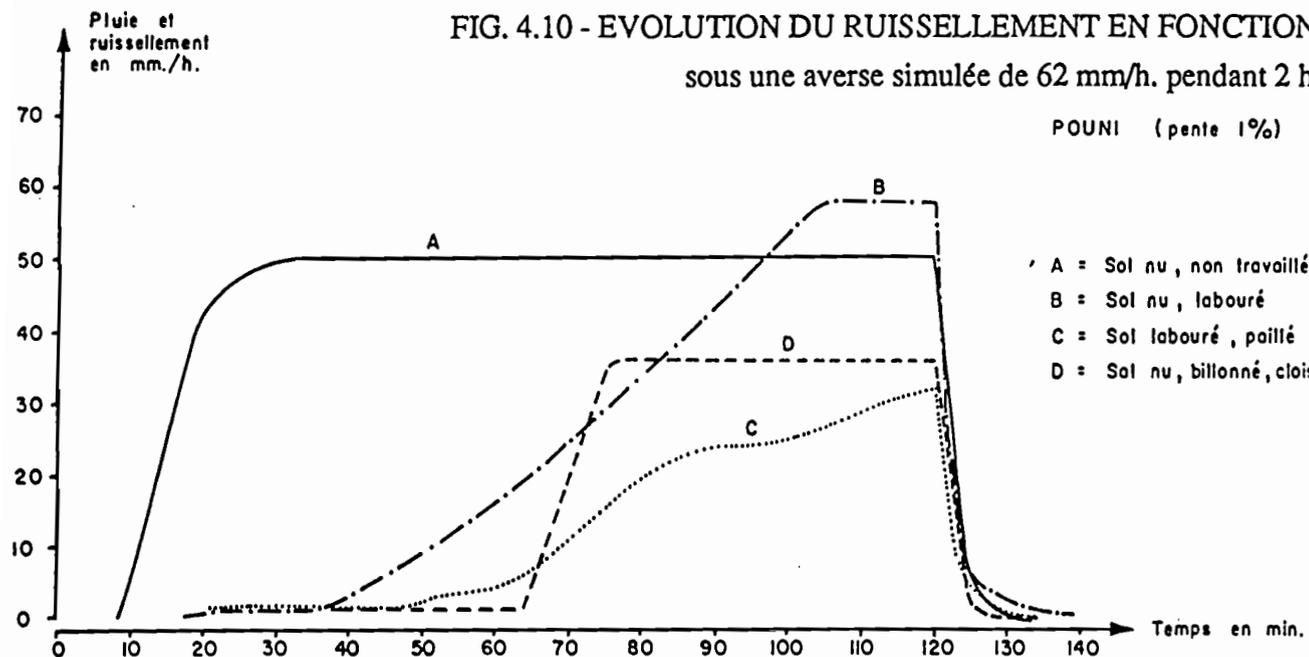
Essais Bidi. Sur couverture sablo argileuse, le labour augmente l'infiltration les premières années ainsi que les rendements (+ 50 à 100 %) mais épuise très vite le sol et le fragilise : au bout de trois ans, l'érosion augmente et les gains de rendement diminuent (voir les structures). Paragraphe 4.8.4.

La figure 4.10 rapporte des observations effectuées sous pluie simulée de 62 mm/h pendant deux heures sur des sols ferrugineux de la zone tropicale sèche au nord de Ouagadougou. Elles confirment la mauvaise infiltration des orages de fin de saison sèche tombant sur un sol encroûté, infiltration réduite à 36 mm, le rôle intéressant mais temporaire du labour qui retarde le ruissellement mais y permet une infiltration de 82 mm, le rôle très positif du travail du sol suivi d'un paillage permettant une infiltration de 104 mm et enfin le rôle très intéressant du sol billonné et cloisonné qui permet d'infiltrer les premiers 60 mm de pluie et maintient une infiltration finale toujours supérieure aux autres cas. Quelle que soit la technique proposée, elle n'est efficace que dans la mesure où elle élimine durablement la pellicule de battance superficielle qui commande pour une bonne part la dynamique de l'eau dans le profil sauf s'il existe un horizon colmaté proche de la surface.

Aux Etats-Unis, pour Duley (1939), l'influence sur le ruissellement de l'encroûtement de la surface d'un sol est finalement plus importante que le type de sol et la porosité de ses différents horizons. Burnell et Larson (1969) ont démontré que le retard apporté au démarrage du ruissellement suite à un labour, dépend moins de la profondeur de sol remué que de la rugosité de la surface du

FIG. 4.10 - EVOLUTION DU RUISSELLEMENT EN FONCTION DES TRAITEMENTS

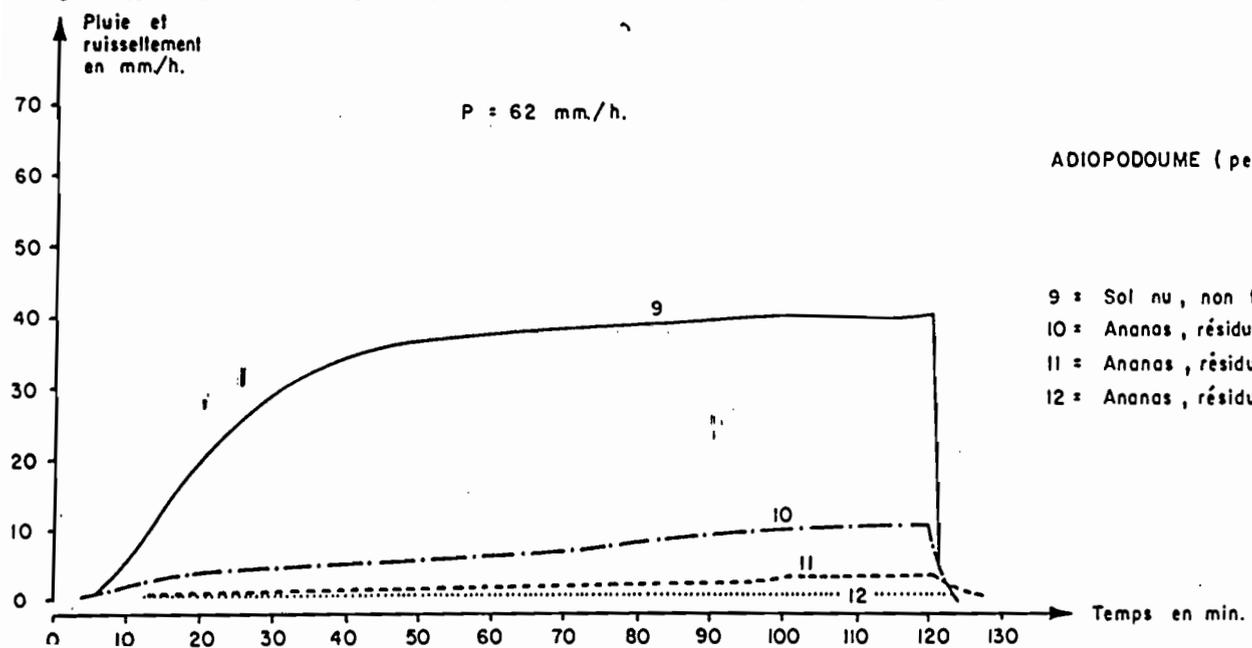
sous une averse simulée de 62 mm/h. pendant 2 heures.



POUNI (pente 1%)

- A = Sol nu, non travaillé
- B = Sol nu, labouré
- C = Sol labouré, paillé
- D = Sol nu, billonné, cloisonné

	Coeff. ruiss. %	Ruiss.max. mm./h.	Infiltration mm.
A	71	50	36
B	33,5	58	82
C	16	29	104
D	22	36	97



P = 62 mm/h.

ADIOPODOUME (pente 20%)

- 9 = Sol nu, non travaillé
- 10 = Ananas, résidus brûlés
- 11 = Ananas, résidus enfouis
- 12 = Ananas, résidus en mulch

	Coeff. ruiss. %	Ruiss.max. mm./h.	Infiltration mm.
9	51	39,5	61
10	9,6	9,9	112
11	2,2	3	121
12	0	0	124

sol. Harrold (1967) pense que dans les régions où l'on craint surtout les orages d'été, intenses mais brefs, le labour profond, en courbe de niveau, peut retarder considérablement le démarrage du ruissellement en augmentant la rugosité de la surface du sol mais aussi sa macroporosité (= pouvoir d'éponge). Le soussolage effectué en sec sur des sols à horizon durci à faible profondeur, peut aussi augmenter l'infiltration à condition de faire éclater la masse de l'horizon induré et colmaté (Biro et Galabert, 1967 ; Masson, 1971).

Mannering, Meyer et Johnson (1966) rapportent qu'en 5 ans de traitement du maïs en minimum tillage, l'agrégation du sol et l'infiltration (gain : 24 %) ont augmentées tandis que l'érosion a baissé de 34 % par rapport au traitement conventionnel (= labour en plein). Ces auteurs insistent sur l'importance qu'il y a d'éviter de pulvériser la surface du sol lors de la préparation du lit de semence. D'où l'idée de n'émietter que la ligne de semis et de laisser les interlignes en grosses mottes recouvertes de déchets de culture (Mannering, Meyer et Johnson, 1966 ; Masson, 1971 ; Shanhold et Lilliard, 1969).

Dans le nord de la France, Derancourt, Masson et Roose (1983) ont testé dans le champ d'un paysan l'effet de l'affinage du lit de semence sur la levée des graines de céréales sur le ruissellement et sur les rendements, ceci sur un sol brun lessivé, sur limon battant. Lorsque le nombre de passages de la herse passe de 2 à 4 et que l'on observe une accélération du tracteur, on constate que le nombre de graines germées par m² diminue de 127 à 59 pieds par m². Le ruissellement d'une pluie simulée de 33 mm/h augmente de 5 à 66 % lorsque le nombre de passages de la herse augmente et le rendement baisse d'environ une tonne. Les paysans ont donc compris qu'avec moins de travail d'une part, on améliorerait la capacité de production du terrain, on améliorerait l'infiltration, on diminuait donc les risques d'érosion et en définitive, on améliorerait les revenus nets de ce paysan (voir tableau 4.6).

Avec le même simulateur de type ORSTOM, furent testées différentes techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion sur des sols bruns, argileux, dits terrefort d'un côteau du Lauragais dans le Sud Ouest de la France, près de Toulouse (Roose, Cavalier, 1987), (tab. 4.7). Sur trois segments de pente, le plateau de 2 à 6 %, le bas de versant de 14 à 20 % et le haut de versant de 22 à 29 %, on a comparé la réaction à une pluie de 40 mm/h, d'une part le témoin qui correspond à un labour grossier d'automne plus une ou deux reprises au printemps, à toute une série de techniques améliorées proposées par les paysans. On constate tout d'abord que le ruissellement global diminue légèrement de 22 à 19 % lorsque l'inclinaison de la pente augmente. Si on apporte un binage supplémentaire, on constate une légère réduction du ruissellement de 19 à 12 %. Si par contre, on fait suivre le hersage d'un rouleau cultipacker, le ruissellement passe brutalement de 20 à 35

TABLEAU 4.7 - EFFET DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LE RUISSELLEMENT ET L'ÉROSION (provoqués par des averses de 40 mm en 1 heure simulées sur des lits de semence de maïs sur terrefort d'un coteau du Lauragais.

Résultats extraits des campagnes 1985-6-7 à Narbons, près de Toulouse (France).

TRAITEMENT	Pente % %	Ruiss. KR 40%	Pi mm	FN mm/heure	C moyen g / l	Erosion g / m ²	Répéti- tion N
témoin = labour automne + + reprise au printemps	2-6 %	22	16	7	2	13	6
	14-20 %	20	13	12	9	93	15
	22-29 %	19	12	16	7	57	4
Id. + binage Id. + lit semence + profond Id. + cultipacker (rouleau)	22-29 %	12	13	(20)	<u>11</u>	58	2
	14-20 %	17	16	8	9	65	4
	14-20 %	<u>35</u>	<u>8</u>	12	<u>18</u>	<u>250</u>	8
Id + compaction 1 fois Id + compaction 2 fois traces de roues	14-20 %	<u>28</u>	13	8	12	105	8
	14-20 %	<u>70</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	103	4
	16 %	<u>83</u>	<u>4</u>	<u>1</u>	--	--	1
labour + reprise à l'automne. C. Vég. = 30 %	22-29 %	<u>32</u>	6	13	9	98	4
décompactage + résidus - déchaumage en automne C. Vég. = 40 %	22-29 %	17	4	<u>21</u>	5	<u>35</u>	5
décompactage + résidus en surface fraisage localisé au printemps	22-29 %	<u>7</u>	<u>20</u>	<u>23</u>	3.6	<u>26</u>	5

- KR 40 % = Coefficient de ruissellement pour une pluie de 40 mm
 Pi = Pluie d'imbibition = limite avant le début du ruissellement
 FN = Cap. infiltration stabilisée mm/h
 Cm = Charge moyenne en g/l
 E 40 = Transport solide en g/m³
 par
 N = Nombre de répétitions
 = = Nettement différent du traitement de référence

FIG. 4.6 - INFLUENCE DE L'INTENSITE (affinage) DU TRAVAIL DU SOL SUR LA LEVEE DU BLE D'HIVER ET LE RUISSELLEMENT D'UNE PLUIE DE 33 mm EN 1 HEURE. D'après ROOSE, MASSON (1983).

Traitements	Labour + semis	Labour + hersage et semis couplé à 4 km/h	Labour hersage + semis à 8 km/h	Labour + vibro cultivateur + 1 semis	Labour + 2 vibro cultivateur + semis
Nombre de passages	2	2	2 (plus rapide)	3 (plus profond)	4
Nombre de grains germés par m ²	127	114	109	73	59
Ruissellement mm %	1,6 5 %	9,1 28 %	12,5 38 %	18,8 57 %	21,7 66 %

D'après Derancourt (1982) et Masson (1982).

% ; le rouleau en effet, a tassé la surface du sol et a fait éclater les mottes en particules fines qui reprennent rapidement en masse pour former une croûte de battance. Si l'on fait passer le tracteur deux fois au même endroit, on constate que le coefficient de ruissellement augmente de 20 à 77 %. De même, dans les traces de roues, on a mesuré un ruissellement de 83 % ; lesquelles proviennent à la fois de la réduction de la pluie d'imbibition, c'est à dire la pluie nécessaire pour provoquer le ruissellement et également une réduction de la filtration finale qui passe de 12 à 4 ou 1 mm par heure. Pour éviter ces tassements au printemps, on a tenté de faire à l'automne toutes les préparations du lit de semence. Dans ce cas, nous avons obtenu également un ruissellement abondant passant de 19 à 32 % car pendant tout l'hiver, le lit de semences s'est dégradé et a formé des croûtes de battance. Si au lieu de labourer on a passé des dents pour décompacter le sol et si on a déchaumé à l'automne la surface du sol, le ruissellement n'a guère diminué. Par contre, si après décompactage à l'automne on a laissé la paille en place et au printemps effectué un fraissage localisé à la ligne de semis, le ruissellement est passé de 19 à 7 %, la pluie d'imbibition est montée à 20 mm et l'infiltration finale est restée à 23 mm/h.

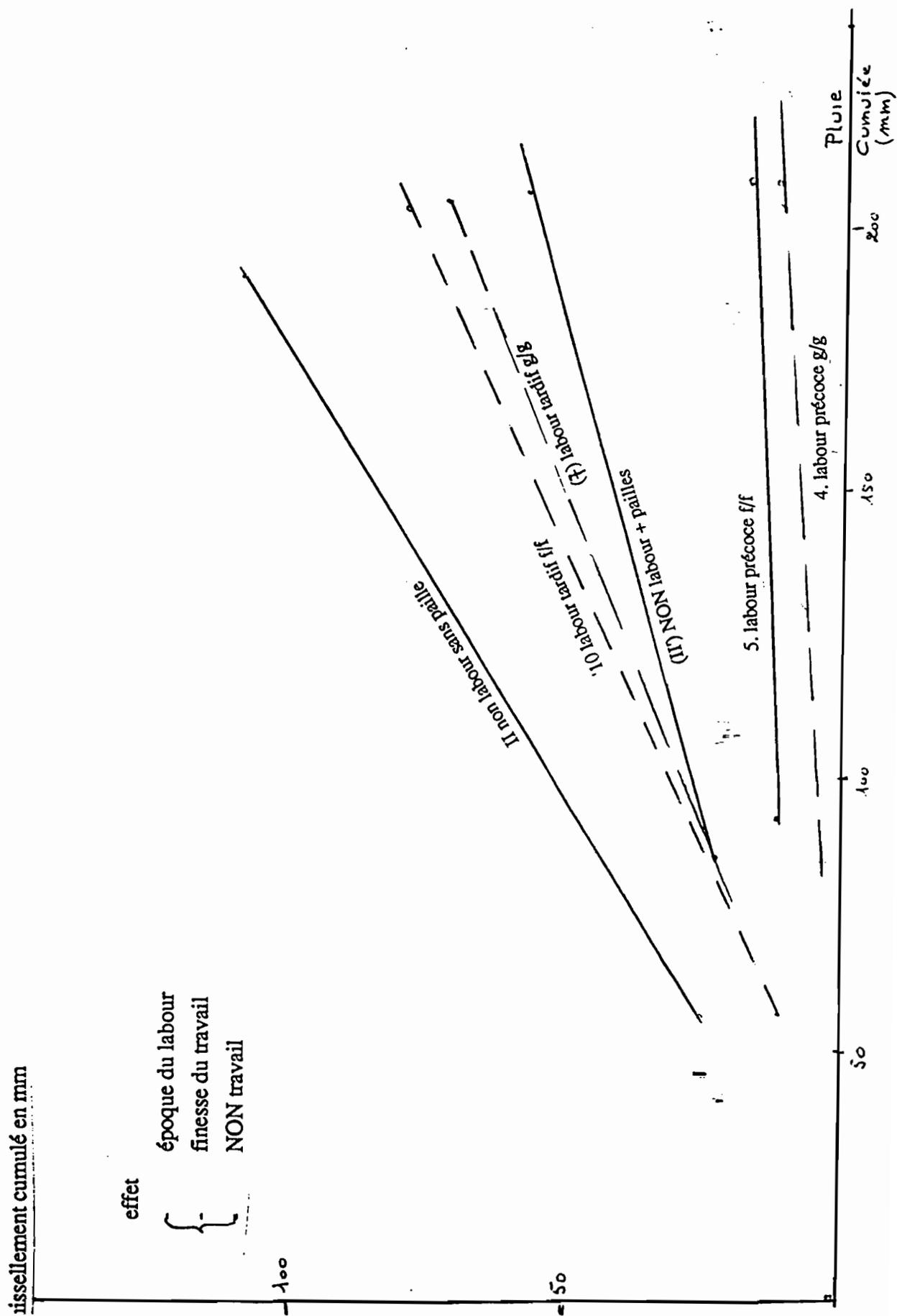
Cet essai met donc bien en évidence l'effet négatif de la compaction et du nombre de passage des outils sur le ruissellement et l'effet positif sur l'infiltration d'un labour grossier à l'automne ou bien d'un décompactage laissant la paille en surface, suivi au printemps d'un travail du sol localisé à la ligne de plantation.

Un essai similaire au simulateur de pluie a été réalisé dans le Centre de la France par une équipe de chercheurs de l'ORSTOM, de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, de l'INRA et de l'Université d'Orléans. Il s'agissait de déterminer les risques de ruissellement en fonction du type de lit de semence du maïs sur un sol brun lessivé, limoneux, très battant.

Six traitements permettaient de rechercher l'effet de l'époque du labour, de la finesse du travail de préparation du lit de semences ou l'effet des résidus de culture en cas de non travail (voir figure 4.11). On constate d'abord que le non travail, s'il s'accompagne d'un sol nu donne le plus de risques de ruissellement. Si par contre, il laisse 50 % de la surface du sol couverte par les pailles, cette méthode ne donne pas forcément plus de ruissellement qu'un labour tardif préparé juste avant les semis. Par contre, un labour précoce, surtout s'il est suivi d'une longue période sèche, permet de maintenir une bonne structure et une bonne infiltration. On constate par ailleurs que la finesse du travail du sol péjore toujours les risques de ruissellement.

En définitive, l'avantage du labour ou du non labour à moyen terme en ce qui concerne l'économie de l'eau et du sol dépend dans une large mesure du type de sol (sensibilité à la battance, compacité, teneur en graviers, perméabilité et teneur initiale en

FIG. 4.11 - LA LAME RUISSELEE = UNE FONCTION DU LIT DE SEMENCE DE MAIS
 Beaumont/Dème ITCF - ORLEANS - ORSTOM (d'après Rahéliarisoa, 1984)



matières organiques), de la pente, de la couverture végétale, de l'utilisation des résidus de cultures, de la date du labour par rapport aux pluies agressives et surtout de la qualité du labour. Le travail du sol est un mal souvent nécessaire au développement des racines, à la maîtrise des mauvaises herbes et à la rupture de la pellicule de battance qui ferme certains sols riches en limon et en sable fin et pauvres en matières organiques (en particulier les sols ferrugineux tropicaux et les sols bruns lessivés tempérés). Il faut éviter d'abuser de ces travaux du sol sur fortes pentes en zone tropicale humide. L'un des principaux thèmes actuels de la recherche, en conservation des sols, est l'utilisation des résidus de la culture et le travail du sol. En effet, il manque encore des preuves de l'intérêt à long terme **sur les plans agronomiques et économiques** de techniques telles que le travail minimum, le travail localisé avec interlignes protégées par les résidus de culture, le stubble mulching et le non labour associé au mulching (mulch tillage), techniques qui toutes semblent avoir une action favorable sur l'économie de l'eau et des terres. En tout cas, plusieurs obstacles pratiques existent encore à l'utilisation de ces méthodes où l'on conserve en surface les résidus organiques : lutte contre les mauvaises herbes (herbicides chers), machines pour éclater le sol sans le retourner (dents vibrantes au lieu de charrue), machines pour semer et problèmes phytosanitaires.

4.6.2. Travail superficiel (sarclobinage).

La formation d'une pellicule de battance ayant une influence considérable sur l'infiltration, on peut espérer qu'un travail superficiel du sol suffise pour réaliser une économie en eau et en terre. En fait, à Adiopodoumé (Roose, 1973), on constate que les effets d'un sarclobinage sur des sols nus sableux sont semblables à ceux d'un labour mais **encore plus temporairement profitables**. Suite à un grattage superficiel à la houe, le sol ne peut absorber qu'une seule pluie peu agressive de 10 à 30 mm et limiter l'érosion durant 1 à 8 jours ; ensuite, l'érosion dépasse celle des parcelles témoins. Si le ruissellement est temporairement ralenti, la turbidité est nettement plus forte et ne décroît qu'avec la formation d'une nouvelle pellicule de battance.

On pourrait tirer les mêmes conclusions des essais de techniques culturales sous pluies simulées sur sols limono argileux et fortes pentes du Lauragais. L'infiltration d'une pluie de 40 mm en une heure a été légèrement augmentée mais la pellicule de battance s'est reformée au bout de ces 40 mm et les pertes en terre sont finalement semblables au témoin car la turbidité est plus élevée (tableau 4.7).

A Bouaké (voir tableau 20), on a observé que le pulvérisage superficiel du sol ne limite peu le ruissellement par rapport au témoin non travaillé et **augmente sérieusement l'érosion**.

TABLEAU 21 - EROSION, RUISSELLEMENT ET RENDEMENTS EN FONCTION DES TECHNIQUES DE PREPARATION DU SOL.

Station de SARIA près de Koudougou, BURKINA FASO

Sol ferugineux tropical lessivé sur cuirasse, pente 0,7 %

D'après Somé et Ouattara, 1991

	Pluie	Sol nu	Grattage			Labour à plat			labour à plat + buttage cloisonné		
		Et/ha	Et/ha	KR %	RDT Et/ha	Et/ha	KR	RDT Et/ha	Et/ha	KR	RDT Et/ha
1983	771	24.2	18.4	36	1,34	20.3	31	1,57	15,0	13	1,86
1984	700	9.3	7.3	31	0,82	6.3	27	1,73	3,5	14	2,46
1985	596	11.8	15.6	30	0,68	7.0	18	1,45	4.2	15	1,99
1986	933	23.5	19.6	32	1,40	20.8	18	2,89	11.1	10	2,88
1988	935	18.5	13.1	22	0,73	13.9	13	2,54	3.0	4	2,29
Moyenne		17.5	14.8			13.6			7.4		

Par contre, sur les glacis ferrugineux tropicaux à pente faible du Burkina Faso, Somé et Ouattara (1991) ont montré qu'on pouvait obtenir des rendements voisins de ceux que l'on obtient après labour à condition de travailler superficiellement le sol chaque fois que la croûte de battance s'est reformée (voir tableau 21). En effet, dans ces zones soudano-sahéliennes, semi arides, le labour entraîne nécessairement un retard des semis par rapport aux semis effectués traditionnellement par les paysans mossi tandis qu'un simple grattage du sol permet aux plantes de s'installer plus rapidement et au ruissellement de démarrer plus tardivement si l'on casse régulièrement la croûte de battance. Là où le labour n'a jamais été adopté par la population, un grattage superficiel derrière un âne est une opération rapide et peu coûteuse à la portée des paysans.

En débloquent la macroporosité de la surface du sol, le travail superficiel du sol peut rendre des services pour améliorer l'infiltration en zones semi arides et même en zone tempérée à condition de maintenir le sol dépourvu de pellicule de battance jusqu'à ce que le couvert végétal puisse prendre le relais. Par contre, la pulvérisation du sol est partout une pratique dangereuse, plus particulièrement sur les pentes fortes ; elle est peu utile et à éviter pendant la période des grosses averses.

4.6.3. Le buttage et le billonnage.

Ce sont des techniques courantes en Afrique pour assurer le bon développement des racines (manioc, igname) un bon drainage dans les zones temporairement humides (y compris les zones soudaniennes) et aussi une manière de rassembler la terre fertile autour des plantes cultivées sur les sols les plus dégradés. Le billonnage permet également de maîtriser plus facilement les mauvaises herbes en donnant aux plants cultivés un avantage de 10 à 20 cm de hauteur par rapport aux adventices. Cependant, le billonnage et surtout le buttage sont des pratiques dangereuses car si théoriquement elles augmentent la surface d'infiltration du sol (donc en principe diminuent le ruissellement), elles augmentent aussi la pente moyenne du terrain, la faible cohésion du sol et concentrent les eaux de ruissellement sur une ligne. Finalement, elles augmentent l'érosion qui croît de façon exponentielle avec la pente du terrain (voir tableau 22), (Roose, 1973-77).

Tableau 22
Effet d'un buttage sur un sol presque nu
- Pente de 7 % ; Adiopodoumé, 1956 -

Mai à août 1956 ; pluies = 1 534 mm	E t/ha	R moy. %	R max. %
P ₂ Manioc planté tardivement sol presque nu sur butte	89,6	26,6	48
P ₃ Manioc planté tardivement sol nu à plat	79,0	28,2	52

Deux essais temporaires durant la campagne de 1956 et 1967 à 1969 à Adiopodoumé suggèrent une légère baisse du ruissellement, une augmentation de l'érosion et de la turbidité sur un sol billonné recouvert de manioc ou de maïs. Mais ces phénomènes n'apparaissent pas toujours très clairement.

Il serait facile de réduire les pertes en terre et en eau des cultures sur buttes et billons en les cloisonnant et en les paillant. Mais dans ce cas, on ne peut éviter la formation d'une structure lamellaire très défavorable dans les sillons et dans les cuvettes formées qui réduisent la capacité d'infiltration du sol en fin de saison des pluies. En zone soudano sahélienne semi aride, la plantation à plat suivie d'un sarclage et d'un sarclobuttage à trois semaines d'intervalle puis d'un cloisonnement, permet sur les glacis ferrugineux tropicaux, d'absorber des averses de l'ordre de 50 à 70 mm qui sont les averses auxquelles on peut s'attendre en début de saison des pluies lorsque le couvert n'est pas encore fixé. Des études effectuées au Burkina Faso par Rodriguez (1986) ont montré que le buttage cloisonné permet d'améliorer de façon significative l'infiltration et finalement, les rendements des cultures (+ 500 g à 1 000 kg/ha/an pour 27 h_e. Jours de travail supplémentaire = 11.000 CFA. Les essais entrepris par le CTFT à Gampela sur des sols gravillonnaires ont montré qu'effectivement, le billonnage en courbes de niveau cloisonné est le seul qui puisse réduire de façon significative le ruissellement et l'érosion en zone soudano sahélienne. Malheureusement, sur ces sols gravillonnaires, peu profonds sur cuirasse, si répandus dans la région, la capacité de stockage des eaux et la fertilité des sols est si basse que le complément d'infiltration ne profite que rarement au rendement des cultures. Dans les essais effectués au simulateur de pluie dans la région du lac Bam

par Collinet et Asseline. Il montre que le billonnage cloisonné sur des pentes de moins de 1 % permet d'infiltrer une hauteur de pluie de 60 mm/h et de stocker dans le sol plus de 100 mm, c'est à dire trois fois autant que si le sol n'avait pas été travaillé.

L'effet d'un labour isohypse et surtout d'un billonnage isohypse est difficile et même discutable à tester sur des parcelles d'érosion d'aussi petites dimensions (5 m de large x 20 m de long). Cependant, il est reconnu par de nombreux auteurs que le travail du sol suivant les courbes de niveau réduit considérablement les risques d'érosion, tout au moins sur des pentes inférieures à 10 %. Sur des pentes plus fortes, la lame d'eau retenue par les billons isohypses diminue et par conséquent, les risques de rupture en chaîne des billons le long des versants augmentent d'autant. Il est donc indispensable de cloisonner les billons pour retenir de l'eau et des sables en place et de prévoir un écoulement des excès dans des exutoires aménagés à l'avance (voir tableau 23), (Roose, 1973-77).

TABLEAU 23 - EFFETS D'UN BILLONNAGE CLOISONNE ISOHYPSE SUR UN SOL SABLEUX DE BASSE COTE D'IVOIRE SOUS CULTURE D'ANANAS.

1956 à 1958		E t/ha	KR moyen %	KR max %
Ananas à plat planté en courbe de niveau	1er an	8,6 et 15,5	17	51
	2e an	0,2	1	5
Ananas billonné cloisonné planté isohypse	1er an	1,6	1	2
	2e an	0	0,2	1

Le drainage en profondeur peut également avoir une influence sur le ruissellement et l'érosion. Dans la région du Centre de la France sur des sols limoneux, Trévisan a montré à l'aide de pluies simulées, l'effet important de la proximité des drains qui diminuent l'humidité persistant dans les macropores, améliore une bonne structure et maintient l'infiltration. La pluie d'imbibition augmente ainsi que la capacité finale d'infiltration. Cependant, dans bon nombre de ces sols comportant une semelle de labour ou un horizon B peu perméable, l'amélioration due au drainage est localisée à une faible distance de ces drains.

Il faut encore souligner ici l'influence très importante de l'aménagement des résidus de culture. Rappelons les résultats obtenus à la figure 6.1 lorsque les résidus d'ananas sont brûlés et enfouis, l'érosion et le ruissellement augmentent beaucoup plus rapidement que lorsque les résidus sont enfouis. Par contre, lorsque les résidus sont laissés à la surface du sol, l'érosion et le ruissellement deviennent négligeables, quelle que soit la pente du terrain. En zone semi aride où l'augmentation de la densité du semis n'augmente pas les rendements car le stockage d'eau du sol est trop faible, l'avenir consiste à mieux aménager la surface du sol, d'une part en effaçant les pellicules de battance et en approfondissant l'enracinement des plantes et d'autre part, en maintenant à la surface du sol un minimum de résidus de cultures.

Sur les sols volcaniques très riches du Sud-Ouest du Cameroun, les Bamiléké ont coutume, sur les fortes pentes, de planter une demi-douzaine de plantes associées sur de gros billons qu'ils orientent dans le sens de la pente. Les agronomes inexpérimentés ont voulu orienter ces gros billons perpendiculairement à la plus grande pente. Ils ont constaté que dans ce cas, lors des plus fortes averses, les eaux se rassemblaient en certains points du versant et débordaient les billons et formaient ensuite des ravines plus graves encore que dans le système traditionnel. Il est important de bien noter que sur les pentes supérieures à 20 %, il est plus avantageux d'orienter les billonnages dans le sens de la plus grande pente, ce qui limite le bassin versant et donc le volume ruisselant entre les billons. Pour les averses petites et moyennes, les dégâts seront évidemment plus importants lorsque le buttage est dans le sens de la pente, il se formera des petites griffes, mais pour les plus grosses averses, il vaut mieux limiter les risques de catastrophe en acceptant un billonnage dans le sens de la pente qui va entraîner certes une érosion non négligeable tout au long de l'année, mais va réduire les risques majeurs de glissement de terrain ou de ravinement. On ne peut donc généraliser la méthode du billonnage isohypse. Une solution élégante consisterait à faire de gros billons en pente légère (< 1 %) vers un exutoire aménagé à l'avance et de prévoir le cloisonnement entre ces billons dans une limite comprise entre 1 et 5 m. Ces cloisons doivent être moins hautes que les billons eux-mêmes pour permettre un drainage latéral progressif lors des averses exceptionnelles.

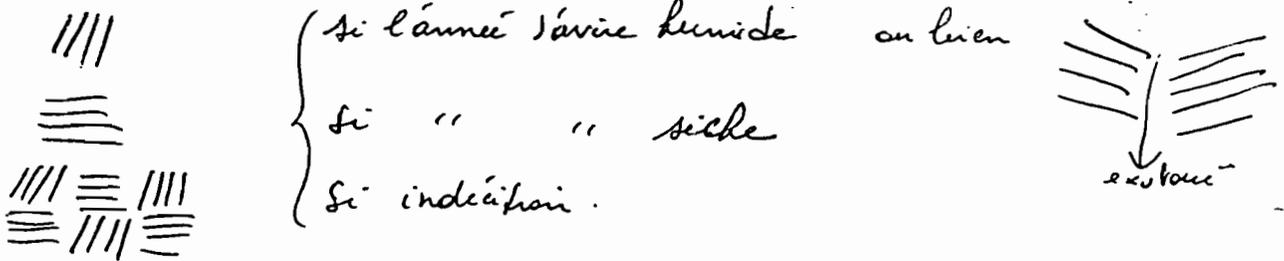
Mais le secret de la réussite des méthodes de billonnage des Bamiléké consiste à maintenir à la surface du sol un couvert permanent très dense grâce à l'association d'un nombre important de cultures qui se développent tout au long de l'année.

Le billonnage () la rugosité du sol
 () la pente de la surface du sol
 () les risques d'érosion
 meilleur que le bullage

si \perp à la pente () l'infiltration de pluie moyenne.
 mais () les risques / de détachement / de ravinement / de glissement de terrain

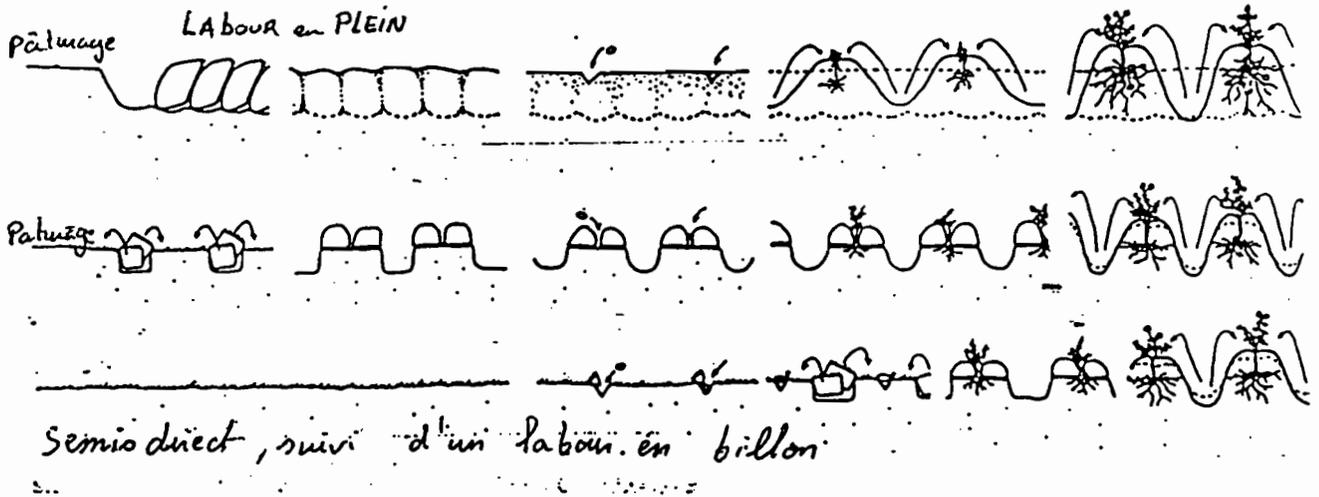
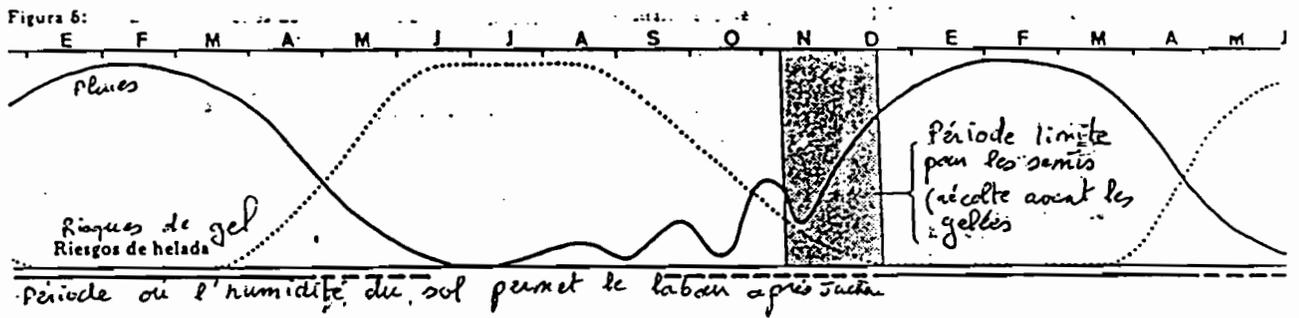
si // pente -> () le ruissellement
 () l'érosion lors des pluies ordinaires
 mais réduit les risques majeurs lors des fortes pluies

Av Pérou :



exercice

Opérations de travail du sol selon différentes modalités de labour



4.7 b) LE FACTEUR C

(couvert végétal et techniques culturales dans l'équation de Wischmeier).

Dans l'équation de Wischmeier, le facteur C est le rapport entre l'érosion mesurée sur une jachère nue de référence et sous une culture bien précise. Il exprime l'interaction entre la plante et les techniques culturales sur la réaction à la pluie d'un type de sol. Il évolue au cours de la croissance du végétal et des changements de l'état de surface du sol et peut se calculer pour chacune des périodes significatives de la culture et de la région considérée : cinq périodes retenues au U.S.A. et jusqu'à neuf périodes en zones tropicales humides à deux cycles culturaux. En ne tenant compte que d'une valeur globale annuelle on a obtenu les valeurs suivantes en Afrique de l'Ouest (Roose, 1973) (voir tableau 4.24).

Le facteur C du modèle U.S.L.E. rend bien compte de l'influence fondamentale du couvert végétal et de l'adaptation des techniques culturales aux conditions écologiques régionales. En ne tenant compte que d'une valeur globale annuelle, ce facteur varie de 0.9 à 0.1 pour les principales cultures de l'Afrique de l'Ouest. Il peut descendre à 0.01 sous culture forestière avec plantes de couverture et sous prairie à 0.001 sous culture paillée et sous forêt plus ou moins dense.

Conclusions sur le couvert végétal et les techniques culturales

Quelles que soient la pente, les techniques culturales et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet (peu importe son architecture et sa nature botanique pourvu qu'il soit presque complet) assure une excellente conservation de l'eau et du sol. Son influence prime celle de tous les autres facteurs. C'est donc aux méthodes biologiques favorisant ce couvert qu'il faut s'adresser en priorité pour assurer l'économie de l'eau, la meilleure production et la conservation du sol avant de penser aux aménagements antiérosifs classiques (terrassements) lesquels sont généralement peu rentables, difficiles à entretenir et parfois même d'efficacité douteuse ou rarement démontrée.

Si le couvert est incomplet, c'est l'inclinaison de la pente qui exerce ensuite la plus grande influence sur le niveau des pertes en terre, mais pas nécessairement sur celui du ruissellement qui dépend beaucoup des propriétés hydrodynamiques de la toposéquence.

Les techniques culturales de type mécanique peuvent aider à réduire temporairement les risques d'érosion. Le travail du sol augmente temporairement l'infiltration, mais en même temps la détachabilité du sol et son érodibilité ; cependant,

TABLEAU 4.10 - FACTEUR COUVERT VEGETAL x TECHNIQUES CULTURALES (C) POUR DIVERSES CULTURES EN AFRIQUE OCCIDENTALE (ROOSE, 1977).

	C annuel moyen	
Sol nu		1
Forêt, fourré dense, culture bien paillée		0,001
Savane et prairie en bon état		0,01
Savane ou prairie brûlée ou surpâturée		0,1
Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, première année	0,3	à 0,8
Plante de couverture à développement rapide ou plantation hâtive, première année	0,01	à 0,1
Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, deuxième année	0,01	à 0,1
Mais, mil, sorgho (en fonction des rendements)	0,4	à 0,9
Riz de plateau en culture intensive	0,1	à 0,2
Coton, tabac en deuxième cycle	0,5	à 0,7
Arachide (en fonction du rendement et de la date de plantation)	0,4	à 0,8
Niebe rampant		0,3
Manioc, première année et igname (en fonction de la date de plantation)	0,2	à 0,8
Palmier, hévéa, café, cacao avec plantes de couverture	0,001	à 0,3
Ananas à plat (en fonction de la pente) plantation hâtive	0,001	à 0,3
<ul style="list-style-type: none"> - avec résidus brûlés - avec résidus enfouis - avec résidus en surface 	0,2	à 0,5
	0,1	à 0,3
	0,001	à 0,01
Ananas sur billons cloisonnés (pente 7 %), plantation tardive		0,1

TABLEAU 4.11 - (CORMARY, MASSON, 1964) EN TUNISIE

	C annuel moyen	
Sur terre nue, jachère nue		1
Arboriculture fruitière		0,9
Blé d'hiver		0,7
Assolement céréalier	-	0,4
Fourrages	-	0,2
Assolement céréalier + fourrages	0,1	à 0,01
Pâturages améliorés		0,01

son influence sur l'enracinement, sur la vitesse de croissance du végétal et sur les rendements en certaines régions est bénéfique si bien qu'il peut réduire en fin de compte les pertes en terre, tout au moins sur certains sols. Il n'en reste pas moins qu'un effort sérieux reste à faire pour mettre au point des techniques culturales rentables, réduisant la quantité d'intrants, réellement adaptés aux cultures et aux conditions écologiques des régions tropicales humides. Aux Etats-Unis, où la mécanisation de l'agriculture a été poussée au maximum, il semble qu'on cherche maintenant à réduire le nombre de passages des engins (minimum /0 tillage) pour limiter la destruction de la macrostructure du sol.

En région tropicale sèche (Charreau, Nicou, 1972), où l'eau manque en début de saison et où les sols sont riches en sable fin et en limon et pauvres en matières organiques, donc sensibles à la battance, le labour semble utile pour assurer un développement correct du système racinaire des plantes cultivées. Le sarclage et le buttage cloisonné peuvent également entraîner une amélioration de l'utilisation de l'eau et de la production.

En région tropicale très humide, le mulching, à partir des déchets de culture pourrait résoudre de façon élégante les problèmes d'érosion, mais la question reste posée de savoir si l'enracinement des plantes cultivées pourra être satisfaisant alors que les pluies diluviennes tassent fortement le sol. Sinon, quel outil conviendrait pour remuer le sol sous le paillage sans trop le perturber ? Des essais menés au Brésil en conditions tropicales humides, au niveau de grandes plantations de maïs, soja, riz et autres céréales, sur des sols ferrallitiques, ont montré qu'il était possible d'associer des plantes de couverture, généralement des légumineuses à enracinement profond, à des cultures à large écartement telles que le maïs, pour permettre de produire sur place la couverture végétale nécessaire pour couvrir le sol et réduire les risques de battance et d'autre part pour augmenter la matière organique et l'activité biologique de la mésofaune dans l'horizon de surface. Le rôle d'aération du sol et de perforation de mégapores reviendrait alors à la mésofaune, en particulier aux vers de terre. Cette méthode n'a pas encore connu de grands développements en Afrique, mais connaît de réels succès aux USA. (Segui, 1990).

4.8 - LA LUTTE ANTIÉROSIVE SUR LES TERRES EN PRODUCTION

La lutte antiérosive, pour la majorité des gens, consiste à appliquer des recettes, des structures antiérosives et des techniques culturales qui ont montré quelque part des aptitudes à retenir l'eau et à ralentir l'érosion : dès lors, il n'est pas étonnant que la majorité des projets comportant la lutte antiérosive ait abouti depuis 50 ans à des échecs.

En ce qui nous concerne, nous définirons d'abord des stratégies de lutte antiérosive, ensuite nous passerons en revue et analyserons l'efficacité de pratiques antiérosives des structures de gestion de eaux de surface, enfin nous tenterons d'aborder les problèmes de systèmes de production avant de pratiquer le modèle empirique de Wischmeier.

4.8.1. Les stratégies de lutte antiérosive.

Nous avons vu au début de ce manuel comment on peut aborder ces problèmes de lutte antiérosive, soit d'un point de vue aval ou du point de vue de l'intérêt des citadins qui tendent à équiper le monde rural en vue de protéger la qualité des eaux (stratégies d'équipement rural). Nous abordons ces problèmes de lutte antiérosive du point de vue des paysans, en vue de répondre à leur problème de dégradation des terres. Et nous parlerons de stratégies de développement rural.

4.8.1.1. La lutte antiérosive selon la stratégie d'équipement.

Dans ce cadre, le bassin versant est l'unité physiographique naturelle d'aménagement, en particulier pour la lutte antiérosive. On procède de la façon suivante :

a) On dresse d'abord la carte des potentialités des terres.

Les américains (USDA) ont défini huit classes de terre en fonction de leurs contraintes pour les grandes cultures.

Les classes 1 et 2 ont des pentes faibles, de 0 à 2 % et sont plus ou moins bien drainées. Ils conviennent pratiquement à toutes les cultures sans aménagement particulier autre que le drainage.

Les classes 3 à 6 concernent des versants cultivables dont les contraintes à la culture augmentent en fonction de la faible épaisseur du sol, du taux de cailloux, des pierres empêchant la mécanisation et en fonction de la pente.

Les classes 7 et 8 doivent être couvertes de végétation permanente, de forêts de protection ou de pâturages extensifs. Ils ne permettent pas la culture (voir la classification en annexe).

Mais chacun doit trouver sa propre classification de potentialité des terres en fonction du climat et des conditions morphologiques et pédologiques locales ; par exemple, en milieu semi aride soudano sahélien du plateau Mossi, on distingue traditionnellement le haut de toposéquence cuirassé ou gravillonnaire à forte pente qui est réservé à l'élevage, au parcours extensif, le glacis à faible pente dans lequel on distingue d'abord une zone sableuse peu profonde dont l'usage est limité et par ailleurs le bloc de culture sera situé sur la zone limono argileuse du bas glacis et enfin les sols de bas de pente qui sont toujours plus ou moins hydromorphes. A côté de la carte d'aptitude des sols, il faudra dresser la carte des risques actuels d'érosion et la carte d'occupation des sols. De la comparaison de ces trois cartes au 10.000 ème on peut dresser une carte d'intervention et d'équipement rural en vue de l'aménagement du bassin.

- b) Il faut ensuite définir les structures permanentes de l'aménagement.

D'abord, le réseau routier, le réseau de drainage, les ponts qui permettent de circuler dans le bassin, en particulier en vue de prélever les récoltes. Ensuite, un système de lutte antiérosive, par exemple des terrasses progressives, définies par des bandes de terre labourées vers l'aval, s'appuyant sur des bandes d'arrêt enherbées ou des talus.

Un système de planches mis au point par l'ICRISAT pour les vertisols sur des pentes inférieures à 2 %.

Un système de gradins à pente nulle pour les zones à forte pression démographique.

Un système de banquettes de diversion telles qu'elles sont connues en Afrique du Nord ou un système de terrasses individuelles, en verger.

- c) Enfin, il faut définir un système de production tenant compte du milieu écologique mais aussi du milieu humain (besoins des populations, rentabilité des productions, marché local, niveau de connaissance des populations et autonomie alimentaire). Il faudra donc développer des rotations, un système de fertilisation et d'amendement, localiser les terres qui seront réservées à la foresterie, celles qui seront utilisées en parcours, les blocs de culture, et les zones irriguées ou drainées. Enfin, prévoir un système de drainage, des exutoires aménagés, la stabilisation des rivières et des ravines, autant que l'organisation du marché régional et des transports.

Dans le cadre de cette stratégie d'équipement rural, l'ingénieur chargé par le pouvoir central d'aménager un bassin versant, définit autoritairement les zones à mettre en défens, les zones où les parcours des animaux seront organisés et l'ensemble des conditions de production dans la région.

4.8.1.2. Les stratégies de développement rural.

Dans le cadre de cette approche de développement rural, l'ingénieur sera amené avant tout à répondre aux besoins des paysans. Il va procéder en trois étapes.

- **Tout d'abord, une première étape de mise en confiance, de dialogue avec la population** au cours de laquelle il procédera à des enquêtes pour définir le système de production, le lieu, l'époque et la façon dont se développent les problèmes d'environnement des paysans. Il cherchera ensuite les relations entre ces problèmes de ruissellement et d'érosion et le système d'exploitation du milieu ; il s'informerera sur la façon dont les paysans conçoivent, observent ces problèmes d'érosion, et quelles sont les solutions qu'ils entrevoient. Enfin il recherche avec eux les méthodes pour augmenter l'infiltration des eaux de pluie en vue d'augmenter la biomasse et les rendements, la rentabilité du travail des paysans et enfin, comment couvrir le sol par les végétaux en vue de réduire les risques d'érosion. Après avoir pris connaissance des problèmes posés et des éléments de solution entrevus par les paysans, il peut soumettre à leurs discussions, des éléments de réponse plus techniques.
- **Deuxième phase : l'expérimentation chez les paysans.** Il s'agit cette fois d'estimer dans les champs des paysans les risques de ruissellement et d'érosion en fonction des types d'averse et ensuite de comparer différentes techniques culturales ou structures antiérosives dans des champs de démonstration chez les paysans et de quantifier, ne fût-ce que superficiellement, la faisabilité, l'efficacité et la rentabilité de chacun des éléments de solution. A la fin de cette phase qui durera nécessairement 3 à 5 ans, doit être prévue une évaluation des réalisations à la fois par les paysans et par les techniciens qui s'occupent de cet aménagement.
- **La troisième phase comporte un plan d'aménagement non plus seulement de parcelles élémentaires, mais de l'ensemble d'un versant, d'une colline, d'un bassin versant ou d'un terroir occupé par une communauté rurale.** A ce stade, on comparera la carte d'aptitude des terres, la carte des dégâts actuels et des risques d'érosion, la carte d'occupation des sols (photo aérienne au 10.000ème) pour définir les aménagements acceptables par les

paysans, de chacun des segments fonctionnels du paysage, en commençant d'abord par le bloc cultivé, par le sommet ensuite et finalement par le bas-fond.

Les études de ces aménagements de terroirs demanderont nécessairement une partie plus importante d'étude des aspects socio économiques concernant les populations et une participation de la population rurale, dès la conception du projet et à chacune des phases d'enquête, de démonstration, d'expérimentation et de généralisation au niveau du terroir.

En observant les modes de gestion traditionnelle des eaux en chaque région, on pourra choisir des méthodes mieux adaptées d'une part aux conditions écologiques de la région sur une longue période et d'autre part, aux habitudes des populations locales.

Il est probable que sous l'effet de la dégradation des sols par la culture, on aboutisse à la conclusion qu'il n'est pas possible d'éviter le ruissellement. Avant donc de mettre en place des structures de lutte antiérosive, il est indispensable d'étudier l'origine du ruissellement dans les différents cas de culture observés sur le paysage local. L'attitude habituelle de l'ingénieur est de partir de l'hypothèse que les pluies les plus intenses ne peuvent être infiltrées et par conséquent, de négliger pour une bonne part les techniques culturales permettant d'augmenter cette infiltration. Or, pour répondre à l'attente des paysans qui est d'augmenter l'efficacité, la rentabilité de leurs travaux, donc les rendements, il faut prévoir une amélioration des conditions d'alimentation hydrique et minérale des cultures et par conséquent, favoriser au maximum l'infiltration totale des pluies, sauf si dans les cas particuliers de montagne, cette infiltration provoque une augmentation des risques de glissement de terrain. Il faut encore se rappeler que des techniques culturales telles que le billonnage cloisonné et le paillage ou la culture sous une couverture permanente vivante ou morte, entraîne une infiltration quasi totale des eaux de pluie. Dans ce cas il n'est donc pas souhaitable d'investir dans la mise en place de structure antiérosive coûteuse et non efficace. Sur les vertisols à pente faible, inférieure à 2 % de la région de Hyderabad en Inde, l'ICRISAT a mis au point un système mixte de drainage des eaux dans le champ par la présence de planches larges et de sillons ramenant les eaux dans un exutoire et de là, dans une citerne creusée dans le sol. Ces eaux de ruissellement stockées dans la citerne, permettront en saison sèche, ou plus exactement en fin de saison des pluies, de donner une irrigation complémentaire aux cultures situées en aval (voir la figure 4.51).

4.8.2. Les pratiques antiérosives

Il s'agit des méthodes mises en oeuvre exclusivement pour réduire le ruissellement et les dégâts d'érosion. (voir tableau 28)

4.8.2.1. La culture en courbes de niveau (Contouring) :

Il s'agit simplement d'orienter les techniques culturales selon les courbes de niveau. En ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler. L'efficacité de cette méthode est limitée aux pentes faibles, elle atteint 0,5 entre 1 et 8 % de pente, n'est plus que de 0,8 entre 8 et 12 % de pente et tend vers 1 au cas où les pentes sont supérieures à 15 % (Wischmeier et Smith, 1965). En effet, plus la pente est raide, moins la rugosité peut stocker d'eau. Une variante consiste à alterner des cultures en bandes isohypses, de façon à cumuler l'effet précédent avec des rotations de cultures plus ou moins sensibles à l'érosion.

4.8.2.2. Le billonnage en courbe de niveau (contour ridging) :

Nous avons vu au chapitre sur les techniques culturales que le labour suivi d'un billonnage pouvait augmenter les risques d'érosion par simple fait qu'il augmente la pente du terrain. Mais si on oriente les billons perpendiculairement à la plus grande pente, ceux-ci peuvent stocker dans le sillon une quantité non négligeable d'eau et de matériaux sableux ou limoneux en suspension. Le billonnage en courbes de niveaux est plus efficace que le simple labour en courbes de niveaux, il réduit l'érosion à environ 30 % du témoin travaillé à plat pour des pentes de 1 à 8 % mais l'efficacité du billonnage diminue lorsque la pente augmente. En particulier sur de très fortes pentes, lors des averses exceptionnelles des risques de rupture des billons provoquant de graves ravinelements ou encore des glissements de terrain imprimant au paysage des ondulations. C'est le cas en particulier si l'horizon de surface est sableux et très perméable alors que les horizons de profondeur le sont beaucoup moins. Une première solution consiste à incliner légèrement le billonnage de telle sorte que les excédents d'eau peuvent rejoindre un exutoire aménagé en circulant à faible vitesse et en transportant très peu de matériaux terreux (voir les expérimentations de Hudson au Zimbabwe). Une autre solution consiste à cloisonner les billons (il s'agit du contour tiedridging). Pour éviter que l'ensemble des eaux stockées derrière les billons se précipite dans une brèche de l'un d'eux et provoque la formation d'une ravine on peut créer après le billonnage une série de cuvettes et de cloisons

perpendiculaires aux billons. Derrière celles-ci seront piégés 30 à 60 millimètres d'eau et les éléments terreux les plus lourds tandis que les excès d'eau pourront circuler derrière les billons pour atteindre des exutoires aménagés. Cette méthode s'est avérée extrêmement efficace et réduit l'érosion au dixième de sa valeur normale. Ces méthodes ne sont valables que sur des sols très perméables jusqu'en profondeur. Pour être efficaces, les cloisons doivent être situées à une distance comprise entre 1 et 5 m .

Exemple :

- les essais sous ananas à Abidjan ;
- les essais de billonnage cloisonné sur les sols ferrugineux tropicaux au Burkina Faso par Matlon et Rodriguez.

Les Bamiléké, au Centre-Ouest du Cameroun, sur des sols volcaniques, ont développé un système extrêmement astucieux. Ils s'agit de gros billons orientés dans le sens de la pente et couverts toute l'année par des cultures associées. Les agronomes ont voulu dans un premier temps orienter ces billons perpendiculairement à la pente. Ils ont rapidement compris que dans ce cas, on augmentait les risques de glissement de terrain ou de ravinement. En effet, pour des averses faibles à moyennes, les billons horizontaux suivant la courbe de niveau captent complètement les eaux de ruissellement et protègent ainsi beaucoup mieux le sol contre l'érosion que les billons orientés dans le sens de la pente. Par contre, lors des plus grosses averses, on observe fréquemment le débordement du ruissellement dans le système de billonnage en courbe de niveau et la formation d'une ravine. Par contre, l'érosion entre les billons qui suivent la plus grande pente est plus réduite car le bassin versant qui alimente les eaux de ruissellement est très limité. Au lieu de ravine on n'y trouve que des petites rigoles qui peuvent être facilement effacées. De plus, ces billons étant couverts toute l'année, l'attaque par les gouttes de pluie s'en trouve réduite et la capacité d'infiltration des sols reste très élevée.

Il est donc délicat de conseiller l'orientation des billons au cas où l'on souhaite réduire l'érosion et ceci en fonction des interactions entre la pente, les systèmes culturaux et les types de sol. Seule l'expérimentation locale permet de décider l'orientation la plus avantageuse et la moins risquée dans chaque système de production.

4.8.2.3. Culture en bandes en courbes de niveau, isolées par des bandes d'arrêt enherbées (buffer stripcropping).

Pour des pentes inférieures à 8 % l'érosion est réduite à 30 % mais l'efficacité des bandes d'arrêt varie en fonction de la largeur des bandes, du mélange d'herbes qui constituent la bande d'arrêt et de l'importance du ruissellement qui traverse la bande sous forme concentrée. Si l'efficacité des bandes d'arrêt est remarquable pour les averses

faibles à moyennes, elles peuvent être rapidement saturées pour des averses exceptionnelles. Elles fonctionnent comme des filtres qui ralentissent la vitesse des écoulements, provoquent une baisse de la compétence du ruissellement donc le dépôt des sables grossiers et des matières organiques qui permet une infiltration croissante du ruissellement, surtout lorsque l'on a un mélange de légumineuses et de graminées et est d'autant plus efficace qu'il y a un grand nombre de tiges ou de racines à la surface du sol par mètre carré (voir les résultats : Roose, Bertrand en Côte d'Ivoire, Abidjan, Bouaké et Delwaulle au Niger). En principe, les herbes à rhizomes rampants à la surface du sol et à tiges nombreuses dispersées au hasard, sont plus efficaces que les herbes en grosses touffes. Au cas où les herbes seraient en grosses touffes, pour éviter que les eaux circulent entre les touffes et y créent des rigoles, il faut laisser à la surface du sol un léger paillage provenant de la taille de ces touffes. Les haies vives plantées en quinconce sur une épaisseur de 50 à 100 cm ont une action similaire aux bandes enherbées. Mais en général, leur efficacité est moins grande, tout au moins durant les premières années. Dans les zones semi arides du Burkina Faso et même au sud du Niger, le semis de bandes d'*Andropogon gayanus* en bordure des parcelles ou tout au moins à une vingtaine de mètres les unes des autres, ont permis de capter une bonne partie des sables transportés par érosion éolienne (Renard, Van der Belt, 1991) ou par érosion hydrique (Roose, Rodriguez, 1990). La méthode des bandes antiérosives a été testée en parcelles d'érosion, à Adiopodoumé et Bouaké en Côte d'Ivoire ainsi qu'à Alokoto au Niger (Roose, Bertrand, 1971; Delwaulle, 1973). On constate qu'une fois installées, les bandes densément enherbées de 0,5 à 4 mètres de large, sont capables de réduire les pertes en terre au dixième, et le ruissellement au tiers environ des valeurs correspondant au témoin. Pour garder une efficacité suffisante, les bandes d'arrêt doivent être d'autant plus larges que le climat est agressif, que la pente est forte, les cultures peu couvrantes et le sol plus érodible. De toutes façons, il est sage de prévoir dans un premier temps des bandes d'au moins 5 m de large, quitte à les réduire plus tard.

Toute végétation herbacée convient pour couvrir la bande antiérosive et en particulier, les herbes de la jachère naturelle, mais la présence de légumineuses à enracinement pivotant et de grandes graminées à enracinement profond, améliore l'infiltration. On peut utiliser *Andropogon gayanus*, *Pennisetum purpureum*, *Paspalum notatum*, *Tripsacum laxum* et divers *Stilosanthes* en mélange, cannes à sucre et diverses plantes fourragères.

Il faut éviter par contre les plantes qui se dispersent trop facilement dans les champs par voie de graines (à moins de faucher les bandes antiérosives avant la floraison), de rejets ou de stolons (*Cynodon dactylon*). Des plantes qui présentent un effet de feutrage de racines et de tiges freineront le mieux le ruissellement. Les arbres isolés par contre, protègent mal le sol contre les eaux ruisselantes.

- production fourragère des bandes pouvant servir à nourrir le bétail ou à procurer du paillage pour les champs,
- usage de ce réseau vivant de courbes de niveau pour orienter des façons culturales,
- la terre n'est pas immobilisée pour délimiter les bandes d'arrêt puisque celles-ci servent à la production. En particulier pour éviter que les paysans qui n'ont pas de vache mettent le feu à ces bandes pour détruire les insectes et autres ravageurs, il est possible d'installer au centre de ces bandes ou bien du côté aval, des arbres, soit des arbres fruitiers, soit des arbres pouvant procurer du petit bois de feu et des perches. La principale difficulté de cette méthode réside dans le démarquage clair et définitif des bandes d'arrêt enherbées par rapport aux champs et aux jachères environnantes. En particulier dans les zones arides où l'herbe a du mal à démarrer à cause du surpâturage et là où on dispose de débris de rochers, l'efficacité de l'aménagement antiérosif sera augmenté en disposant les blocs de pierres en cordons continus dans les bandes d'arrêt (voir Roose, Rodriguez, 1990 et Delwaulle, 1973). Dans cette méthode, on combine la culture en courbes de niveaux et en bandes isolées par des bandes d'arrêt : on limite donc la longueur de pente en même temps que progressivement l'inclinaison de la pente par la formation naturelle de talus enherbés. Ces méthodes sont déjà appliquées à grande échelle dans les pays de montagne et sont actuellement testées en zone semi aride au Mali, au Burkina, au Cameroun. Elles existent depuis des siècles en Europe, en Amérique ainsi qu'en Asie où l'on observe des talus protégés par l'herbe et par des buissons qui peuvent atteindre de 2 à 4 m de haut (voir rapport Roose, Burundi ; fig. 1 sur l'évolution d'une bande d'arrêt en talus enherbé planté à l'aval avec des arbres et à l'amont de légumineuses arbustives).

4.8.2.4. Le paillage

Etant donné d'une part l'agressivité des pluies, et d'autre part la perméabilité et la résistance naturelle des sols ferrallitiques à l'érosion hydrique, le problème principal de ces zones tropicales humides consiste à couvrir la terre durant la période critique des fortes pluies pour éviter la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol et la formation de croûtes ainsi que de ruissellement. Or, les conditions naturelles sont telles que la plupart des cultures vivrières (en particulier manioc, igname, maïs, arachide) et certaines cultures industrielles (banane, ananas, etc...) n'arrivent pas à couvrir suffisamment le sol avant la période critique des fortes averses. C'est sous cet angle de complément temporaire à la couverture végétale qu'est envisagée l'efficacité

d'un paillage léger, soit constitué des résidus de cultures soit d'apports extérieurs ou d'un conditionneur de sol (par exemple, le Curasol) susceptible de créer une croûte souple protégeant la surface de la terre. Une couverture morte (un paillage de résidus ou une couche de cailloux) peut remplacer avantageusement une couverture vivante en ce qui concerne l'économie de l'eau et la protection du sol. C'est ainsi qu'une parcelle couverte de quelques centimètres de paille (4 à 6 t/ha) protège le sol aussi bien qu'une forêt dense secondarisée haute de 30 m même en année très pluvieuse (voir tableau 26). Le paillage, méthode bien connue des horticulteurs est donc très efficace pour conserver l'eau de ruissellement et le sol. Il mérite d'être vulgarisé en milieu traditionnel où les champs sont toujours entourés de quantités de broussailles disponibles.

Il n'en va pas toujours de même en milieu semi-aride en particulier dans les zones soudano-sahéliennes qui sont surpâturées durant la saison sèche où tous les résidus de culture sont utilisés par le bétail ou pour l'artisanat et où les sols sont pratiquement nus au début de la saison des pluies. Dans ces régions, le problème est de trouver du paillage. Bien que la méthode du paillage soit parfaitement connue, elle est généralement limitée à la fertilisation des champs des paysans les plus pauvres qui ne disposent pas de bétail ni de fumier.

Dans ce cas, ils circulent en brousse pour ramasser des branches d'arbustes (Bauhinia et Piliostigma), légumineuses non appréciées par le bétail, les disposent à la surface de leurs petits champs, en vue d'une part de réduire le ruissellement et d'autre part, d'attiser l'activité des termites qui vont permettre d'ouvrir des voies d'infiltration dans le sol et de redistribuer la fertilité contenue dans ce paillage. Collinet et Valentin (1981) ont montré par ailleurs, à l'aide de pluie simulée, que le paillage pouvait ralentir la diminution de l'infiltration du sol après culture. Cependant, lorsque les sols sont peu perméables et que par ailleurs ils sont pauvres en matières organiques, ces sols peuvent être rapidement dégradés sous paillage, simplement par humectation et dessiccation à la surface du sol. Leur efficacité est donc fonction de leur texture et de la possibilité du sol de résister à la dégradation par simple humectation ou par dispersion des argiles lorsque la capacité d'échange est riche en ion sodium. Dans les montagnes tropicales, en particulier au Rwanda et au Burundi, on peut observer dans le paysage des champs de caféiers paillés depuis 40 ans qui n'ont souffert d'aucune érosion. Ceci démontre à quel point le paillage peut être efficace à la fois pour maintenir la fertilité du sol et sa capacité d'infiltration, et le protéger de l'érosion. Le problème est de rassembler tout au long de l'année suffisamment de biomasse pour garder à la surface du sol une couche de quelques centimètres de paille. A l'origine, le paillage sous les caféiers avait deux fonctions : d'une part il fallait accumuler 5 à 20 cm de paille à la fin de la saison des pluies pour maintenir l'humidité et la fraîcheur du sol sous les caféiers. La deuxième fonction est de protéger la surface du sol, cette fois par une mince couche de paille de 2 à

5 cm. L'expérience a montré que sur les petites unités de production de l'ordre de 1 ha sur forte pente dans ces régions de montagne, il est difficile de produire suffisamment de biomasse pour couvrir l'ensemble de la surface d'autant plus que cette biomasse est consommée en priorité par le bétail en vue de produire du lait, de la viande et du fumier. Il semble qu'en transformant les talus existant actuellement en talus inclinés productifs couverts d'une part d'herbacées, d'autre part ayant une double haie de légumineuses arbustives (*Leucaena leucocephala* ou *Calliandra calothyrsus*, etc...) et si on implante à l'aval du talus des arbres tous les 5 m on arrive à produire suffisamment de biomasse pour recouvrir la surface du sol, tout au moins après la préparation du lit de semence et après le semis en taillant les haies et en épandant à la surface du sol les produits d'émondage. Quelques mois plus tard, il sera possible de récupérer les brindilles comme combustibles pour chauffer les repas. Cette méthode est actuellement à l'étude au Rwanda et au Burundi. Une autre source de paillage peut être l'utilisation des résidus de culture (ISAR).

En culture industrielle il n'est pas toujours aisé de se procurer la masse de matière verte nécessaire pour pailler de façon économique. Toutefois on peut laisser à la surface du sol le maximum de résidus de culture pour le protéger entre deux cultures et même durant la culture suivante. Cette technique, dont il existe de multiples variantes, est très en vogue aux Etats-Unis (stubble mulching) mais demande des instruments particuliers pour aérer le sol sans le retourner et sans déranger le mulch.

Lal (1975) propose tout simplement de repousser les résidus de culture entre les lignes de plantation et de ne préparer le lit de semences pulvérisé que sur la ligne de semis. Sur des parcelles préparées de la sorte, au Centre IITA de Ibadan (Nigeria), il a observé que la vitesse d'infiltration reste maximale sous les résidus de culture disposés à la surface du sol grâce à l'activité des vers de terre, et que le ruissellement et l'érosion restent faibles quelle que soit la pente, alors que les pertes en terre croissent exponentiellement avec la pente sur les parcelles labourées voisines. L'essai mis en place à Adiopodoumé par l'ORSTOM avec la collaboration de l'IFAC, de la SALCI et de la SOCABO montre bien le rôle des résidus de cultures dans le cas de plantations d'ananas et le rôle du travail du sol dans l'économie de l'eau en fonction de la pente. Durant le premier cycle de plantation, il a plu environ 2000 mm et l'érosion moyenne sur trois pentes (4-7 et 20 %) fut de 197 t/ha. Sous plantation d'ananas à plat, en lignes perpendiculaires à la pente, les résidus de la culture précédente étant brûlés et enfouis, l'érosion n'a pas dépassé 25 tonnes. Pour un traitement analogue mais dans lequel les résidus furent enfouis, l'érosion est encore de moitié inférieure (12 tonnes). Enfin si on laisse les résidus en surface, le couvert végétal est total et l'érosion est négligeable (0,4 t/ha soit 1/100 du sol nu et <1/60 de la culture d'ananas lorsque les résidus sont brûlés et enfouis). De même, le ruissellement a atteint en moyenne 36 % sur sol nu, 6 % sous le

couvert d'ananas, 2 % lorsque les résidus sont enfouis et 0,6 % lorsque les résidus sont laissés à la surface du sol. De plus, on n'observe pas d'augmentation significative du ruissellement sous paillage lorsque la pente passe de 4 à 22 %. La conclusion la plus importante c'est que grâce à la disposition des résidus de culture à la surface du sol, il ne faut plus craindre l'érosion lorsque la pente augmente : on peut donc envisager d'abandonner la culture strictement en courbes de niveau, ce qui faciliterait grandement la mécanisation de l'agriculture.

Il est bon enfin de rappeler ici que l'enfouissement de matières organiques dans le sol peut améliorer la résistance à la structure, la résistance à la battance des pluies. C'est ainsi que sur le nomographe de Wischmeier, le gain de 1 % de matières organiques dans l'horizon superficiel du sol permet de gagner 5 % des pertes en terre par résistance de la structure pour les sols limoneux et 3 % pour les sols argileux ou sableux. Mais ceci exige une quantité considérable de matières organiques à enfouir dans le sol car dans les régions tropicales humides, la majorité des matières organiques disparaît rapidement dans le sol et ne laisse qu'une faible partie (moins de 5 % de matières organiques sous forme d'humus stabilisé). Par contre, si cette même quantité de résidus est épandue à la surface du sol, elle va réagir comme un mulch et entraîner une réduction de l'ordre de 60 à 99 % des pertes en terre sur parcelles. Il semble donc que la gestion de la biomasse à la surface du sol, à la fois, réduise de façon considérable les pertes du système par ruissellement et érosion, et recycle les éléments nutritifs en les mettant progressivement à la disposition des plantes tout au long de la saison des pluies. En effet, les observations sur le terrain, tant en milieu tropical humide dans la station d'Adiopodoumé qu'en zone semi aride en particulier à Saria au Burkina Faso, les résidus culturaux peuvent couvrir la surface du sol pendant 3 à 5 mois, le temps nécessaire pour que la plante cultivée arrive à couvrir le sol à plus de 80 %, niveau suffisant généralement pour réduire l'érosion à un niveau tolérable.

Le paillage artificiel : CURASOL en pulvérisation

Les méthodes de paillage et leurs variantes entraînent généralement des contraintes techniques (risques phytosanitaires, risques de maladies par insectes et risques d'invasion par les mauvaises herbes) ou des contraintes économiques (la collecte du paillage = 250 à 300 hommes x jour) mal acceptées en grande culture industrielle. D'où l'idée de tester un paillage artificiel susceptible d'être facilement épandu avec du matériel de pulvérisation existant dans bon nombre d'exploitations mécanisées. Nous avons testé un acétate de polyvinyl* (ce produit est vendu sous le nom de Curasol par la firme HOECHST). A Adiopodoumé, ce produit a été pulvérisé juste après labour, planage et

plantation, à une dose unique de 60 g de Curasol diluée dans 1 litre d'eau/m² de sol. Après quelques heures d'ensoleillement, ce produit laiteux et collant forme une croûte souple de 1 mm d'épaisseur qui protège le sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

On a testé ce traitement durant quatre années sur trois couples de parcelles :

- une pente de 7 % plantée en *Panicum maximum* à 40 x 40 cm ;
- une pente de 7 % en sol nu ;
- une pente de 20 % en sol nu.

Tableau 27

Au tableau 27 on peut constater que le Curasol a réduit considérablement les pertes en terre (réduction de 40 à 75 %) et dans une moindre mesure, le ruissellement (réduction de 20 à 55 %). Son action protectrice diminue après trois mois de pluie violente (1.200 mm) mais elle reste encore sensible au bout d'un an. Son épandage n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements en fourrage (*Panicum*) mais il a été particulièrement efficace contre l'érosion sous ce couvert végétal.

Il n'était pas évident a priori que l'épandage de cette colle plastique puisse diminuer le ruissellement. Elle aurait pu obstruer les porosités de la surface du sol. L'observation sur le terrain montre que la pulvérisation sur un sol bien aéré (labour récent) forme une croûte souple qui augmente légèrement le ruissellement par rapport au témoin pendant quelques averses. Ensuite, la porosité du sol non traité diminue plus vite que celle de la parcelle protégée par le Curasol : le bilan devient alors favorable à l'usage de ce dernier. Celui-ci ne constitue pas un film continu imperméable, mais enrobe les agrégats de la surface du sol et les rend plus résistants à l'agressivité des pluies.

Le Curasol laisse toujours place à une certaine érosion. La protection n'étant pas uniforme et continue, les eaux découvrent les points faibles de la croûte : l'énergie des gouttes de pluie qui creusent des trous dans lesquels les eaux ruisselantes s'engouffrent, sapent la base des microfalaises ainsi formées et élargissent les plages attaquées par érosion régressive. Si donc un couvert végétal protège la croûte souple de plastique contre l'énergie des pluies, le film de Curasol résiste plus longtemps. Signalons enfin que le film plastique ne supporte ni l'abrasion des grains de sable transportés dans une rigole active, ni le passage d'engins mécaniques lourds (tracteurs, etc...) ni le passage des manoeuvres : l'érosion s'installe très vite aux points de rupture.

Bien que très efficace, le traitement au Curasol n'a pas suffi pour réduire l'érosion sur sol nu au-dessous de 10 tonnes de perte en terre, valeur tolérable sur ce genre de sol. Son prix de revient (200.000 CFA/ha en 1973 pour une dose moyenne de 60 g/l/m²) et la

TABLEAU 27 - EFFET D'UN MULCH PLASTIQUE SUR SOL NU ET PANICUM, SUR L'EROSION (t/ha) ET SUR LE RUISSELLEMENT (KR %). D'après Roose, 1975.

ADIOPODOUME 1970-1974			EROSION (t/ha et % du témoin)						RUISSELLEMENT (mm, % et % du témoin)					
Précipitations		<i>Panicum</i> , p : 7 %		Sol nu, p : 7 %		Sol nu, p : 20 %		<i>Panicum</i> , p : 7 %		Sol nu, p : 7 %		Sol nu, p : 20 %		
	h(mm)	RUSA	Témoin t/ha	Curasol % témoin	Témoin t/ha	Curasol % témoin	Témoin t/ha	Curasol % témoin	Témoin mm et % de pluie	Curasol % témoin	Témoin mm et % de pluie	Curasol % témoin	Témoin mm et % de pluie	Curasol % témoin
5/70 à 3/71	1389	1057	89,2	25 %	150	50 %	532	27 %	368 MM 26,5 %	37 %	575 MM 41,4 %	56 %	423 MM 30,4 %	40 %
4/71 à 3/72	1816	1023	4,1	30 %	139	55 %	618	59 %	190 mm 10,5 %	77 %	562 mm 31 %	105 %	286 mm 15,8 %	49 %
4/72 à 3/73	1562	819	1,2	10 %	114	50 %	273	57 %	106 mm 6,8 %	16 %	593 mm 36,3	66 %	363 mm 23,2	55 %
4/73 à 4/74	1887	1165	15,0	34 %	191	71 %	626	40 %	146 mm 7,7 %	34 %	942 mm 49,9	70 %	425 mm 22,5	91 %
Moyenne	1164	1016	27,4	26 %	149,4	58 %	512,3	45 %	203 mm	43 %	668 mm	73 %	374 mm	79 %

Le ruissellement observé sur les parcelles témoins est présenté sous deux formes : la lame ruisselée en mm
le coefficient de ruissellement en % de la hauteur de pluie.

grande quantité d'eau nécessaire pour l'épandre (10 m³/ha) sont des inconvénients majeurs à son utilisation courante en agriculture, même intensive. Cependant, le Curasol peut jouer un rôle très efficace pour la fixation des talus de route, les canaux d'irrigation et les surfaces décapées des zones urbaines ou industrielles, si on le projette en mélange avec certaines graines herbacées et avec les engrais nécessaires à leur développement.

A titre de comparaison, on peut signaler qu'en Côte d'Ivoire il faut 250 journées de travail pour récolter en brousse et répartir sur le champ 40 à 80 t/ha de broussailles soit 50.000 F CFA en 1973. Il faut compter 4 fois plus en 1990. Si on dispose d'un champ de Guatemalagrass (*Tripsacum laxum*), le travail est réduit à 150 journées pour obtenir un paillage épais. Or des essais ont montré qu'il suffisait de 4 à 6 tonnes de paille sèche pour obtenir une protection satisfaisante contre l'érosion (Mannering et Meyer, 1963 ; Lal, 1975), on pourrait donc encore réduire le prix de revient de cette technique. On pourrait conclure que la valeur conservatrice des différentes formes de paillage a été maintes fois démontrée et jamais démentie. Si son extension reste limitée, c'est qu'il reste à démontrer son applicabilité en milieu tropical sur différents sols dans divers milieux humains (problèmes d'herbicide et de produits phytosanitaires) et à mettre au point des outils sachant aérer le sol sans déranger le paillage ou encore des systèmes de culture sans travail du sol dont la rentabilité aurait été éprouvée sur de longues périodes.

4.8.2.5. Les couvertures vivantes ou mortes et les plantes de couverture

Comme la difficulté principale rencontrée pour le paillage est de produire et de transporter la biomasse sur le champ, une fois le sol préparé et planté, il était naturel de tenter de produire cette biomasse sur place. C'est ainsi que furent testées, d'abord au Brésil depuis une vingtaine d'années (voir Leprun et Ségy) puis au Nigeria (Juo, Jonhson, Lal, station IITA à Ibadan), l'introduction d'une culture de légumineuse à enracinement profond semée en dérobée sous un maïs ou une autre céréale. Tant que la culture principale se développe et exploite les couches superficielles du sol, elle ralentit la croissance de la légumineuse qui en profite pour envoyer des racines pivotantes en profondeur sous la zone exploitée. Petit à petit, la légumineuse forme un tapis de feuilles et de tiges plus ou moins décomposées. Dès que la récolte principale a été effectuée, l'espace et la lumière permettent un fort développement de la légumineuse pendant les quelques semaines où il reste encore assez d'eau dans le sol sous la zone exploitée par la culture principale. Durant la saison sèche, le sol est donc couvert par un tapis qui favorise l'activité de la mésofaune, vers de terre en région tropicale humide, et termites en zone semi-aride ou sur les sols trop sablonneux. Au début de la saison culturale suivante, ou bien la sécheresse a tué l'ensemble de la couverture de légumineuses et l'on a à faire à une

couverture morte ou bien elle a laissé suffisamment d'eau pour rester vivante ou pour faire renaître une couverture vivante grâce aux graines émises par la légumineuse ; dans ce cas, ou bien on tue la légumineuse à l'aide d'herbicide (3 l/ha de Gramoxone) et l'on en profite pour tuer également les autres herbes qui auraient pu se développer, ou bien on la laisse se développer mais on la rabat avant d'entamer la culture suivante. Au lieu d'enfouir cette litière pour préparer le terrain pour la culture suivante, on la fend à l'aide d'un disque crénelé, on éclate le sol à l'aide d'une dent derrière laquelle sont injectés les engrais de fond et la graine. Une razette ramène la terre sur la ligne de semis et une roulette la tasse pour assurer un bon contact entre l'humidité du sol et la graine. Dans ce système, moins de 10 % de la surface du sol est nue, ameublie et susceptible d'être attaquée par l'érosion. L'expérience montre que la surface du sol n'est pas dégradée, les sables restent liés aux matières organiques et qu'il y a très peu de risque d'érosion et de ruissellement avec cette méthode. Elle présente aussi un certain nombre d'avantages, en particulier elle permet, comme en milieu forestier, d'équilibrer le bilan de matières organiques et de ramener à la surface un certain nombre d'éléments nutritifs qui seront redistribués dans le sol au cours de toute la saison des pluies. Voilà une technique élégante qui permet à la fois de réduire les intrants, les fertilisants et les techniques culturales, tout en protégeant le sol contre l'agressivité des pluies et les pertes par érosion. Il est possible que l'élimination du ruissellement permette une alimentation hydrique des deux cultures et donc réduise la concurrence entre ces deux cultures. Ce système peut être comparé à l'ancienne méthode des engrais verts qui consistait à introduire une culture au moment de la jachère et d'enfouir cette culture avant la fin de la saison des pluies. Il serait donc possible simplement, d'exploiter une partie de cette culture et de laisser la plante de couverture à la surface du sol sous forme de litière. L'usage de plantes de couverture diverses et en particulier de légumineuses est bien connu et très répandu sous les cultures arborées industrielles telles que les palmiers, les cocotiers, les hévéas, les caféiers et les cacaoyers. Il semble que l'on puisse mettre au point une adaptation de ce système sous les cultures temporaires sarclées et trouver enfin un système plus stable que les systèmes intensifs où les intrants à la fois engrais, minéraux et travail du sol, sont utilisés en grande quantité.

4.8.3. Les pratiques antiérosives dans l'équation de Wischmeier

Le facteur "pratiques antiérosives" (P) est le rapport entre les pertes en terre sur un champ aménagé et celles d'une parcelle de taille voisine non aménagée ou encore de la parcelle de référence. Les parcelles d'érosion de petite taille (100 à 200 m²) sont généralement mal adaptées à l'étude des pratiques antiérosives : il faudrait effectuer des comparaisons sur de petits bassins versants d'une superficie d'un ha environ. On se

bornera donc ici à mettre en parallèle les résultats acquis en Afrique du Nord, en Afrique de l'Ouest, avec les coefficients préconisés aux Etats-Unis après de nombreuses études sur petits bassins versants (Wischmeier, 1958 ; Roose et Bertrand, 1971 ; Roose, 1973 ; Delwaille, 1973 ; Masson, 1980 et Millington, 1984).

Les techniques antiérosives de terrassement pour la diversion ou pour l'absorption totale des eaux ne figurent pas dans ce tableau n° 28, car on en tient compte dans le facteur topographique où la longueur de pente va être réduite à la largeur des bandes cultivées entre deux banquettes. Il existe d'ailleurs très peu d'études démontrant scientifiquement la réduction des pertes en terre des bassins versants après aménagement par terrassement. La plupart des études confondent les effets sur l'érosion, des terrassements et ceux de l'amélioration du couvert végétal provoqués en même temps sur le même bassin versant (Roose, 1974 ; Goujon et Bailly, 1974).

Tableau 28

Ce tableau 28 montre de façon éclatante que les techniques biologiques (couverture maximum du sol, usage d'engrais, travail correct, paillage, plantes de couverture, rotations, etc...) sont bien plus efficaces que les techniques mécaniques (terrasses, billonnages, etc...) qui sont coûteuses à implanter et difficiles à entretenir. Ces dernières sont cependant les plus développées dans les manuels de conservation des sols et préconisées la plupart du temps sans étude préalable d'adaptation (Roose, 1971, 1972, 1973, 1974 et 1977). Il faut cependant remarquer que plus les zones sont arides et plus les méthodes biologiques sont délicates à mettre en place, plus il faudra faire appel à des méthodes mécaniques pour aider les végétaux à s'implanter et à couvrir rapidement le terrain.

4.8.4. Les structures antiérosives en relation avec les modes de gestion de l'eau.

Il arrive forcément des averses pour lesquelles le sol ne peut absorber toute l'eau. La lutte antiérosive doit donc prévoir la gestion de ces eaux de ruissellement. Il existe quatre modes de gestion des eaux auxquels correspondent des structures antiérosives :

- la capture du ruissellement pour l'irrigation d'appoint (runoff harvesting),
- l'infiltration totale (water absorption),
- la diversion des eaux excédentaires (runoff diversion),
- la dispersion de l'énergie du ruissellement (runoff spreading).

TABEAU 28 - LE FACTEUR "PRATIQUES ANTIEROSIVES P" DANS LE MODELE DE PREVISION DE L'EROSION EN NAPPE DE WISCHMEIER et SMITH (1960)

<u>USA (Wischmeier et Smith, 1978)</u>		longueur max		P	
- Labour isohypse (contouring)	1 à 8 %	122	61 mètres	0,5	
	9 à 12 %		36 m	0,6	
	13 à 16 %		24 m	0,7	
	17 à 20 %		18 m	0,8	
	21 à 25 %		15 m	0,9	
- Billonnage isohypse = labour isohypse x 0,5				idem x 0,5	
- Labour isohypse entre bandes enherbées					
	1 à 8 %	40	30 m	0,25	--> 0,50
	9 à 16 %		24 m	0,30	--> 0,60
	17 à 25 %		15 m	0,40	--> 0,90
<u>Afrique de l'Ouest (Roose, 1977)</u>					
- billonnage isohypse cloisonné				0,2 à 0,1	
- bandes antiérosives de 2 à 4 mètres de large				0,3 à 0,1	
- mulch de paille de plus de 6t/ha				0,01	
- mulch Curasol à 60g/l/m2 (selon pente et culture)				0,5 à 0,2	
- prairie temporaire ou plante de couverture (selon le couvert)				0,5 à 0,01	
- bourrelets de terre armés de pierres ou lignes d'herbes pérennes ou murettes en pierres sèches tous les 80cm de dénivelé plus labour isohypse plus binage plus fertilisation				0,1 à 0,05	
<u>Sierra Leone (Millington, 1984)</u>					
	temps nécessaire pour 100 mètres	sur riz		sur haricot	
		E t/ha/an	P	E t/ha/an	P
- gradin horizontal	808 heures	7.5	0,14	-	-
- bourrelet de pierre	31	29.5	0,5	4.4	0,1
- ligne de piquets	30	27.3	0,5	27.3	0,5
- bourrelet isohypse	19	17.9	0,3	16,8	0,3
- aucune méthode	-	41 à 55	1	11 à 55	1

4.8.4.1. Structure de capture du ruissellement venant d'un impluvium.

Dans les pays semi arides où la pluviosité ne permet pas la culture sur l'ensemble du versant, on réserve une partie de ce dernier pour favoriser le ruissellement, lequel est récupéré en aval pour irriguer des surfaces réduites, pour compléter les apports pluviométriques et améliorer la sécurité de production des cultures. (Voir Hudson, 1990, F.A.O. Bull. Pédologie n° 57).

En Tunisie, Gosselin (1939) a étudié l'aménagement de l'espace rural en fonction des facteurs hydrogéologiques (voir El Amami, 1983).

Il distingue en amont, des bassins, les "tabias", petits barrages de terre de forme trapézoïdale, armés à l'aval d'un mur de pierres et sur les côtés, d'un exutoire empierré, haut de 2 à 5 m qui barre une vallée de quelques dizaines de mètres de large. Derrière la tabia qui sert de chemin (rass), s'accumulent les eaux de ruissellement et des sédiments limono sableux délimitant le jessour, sorte de champ bien alimenté en eau, où croissent des cultures annuelles (orge, pois, lentilles, fèves, pastèques) à l'ombre d'arbres bien adaptés aux apports sédimentaires successifs (figuiers, oliviers, grenadiers, amandiers). (Voir fig. 4.40 et 4.41).

Sur les versants, sont aménagées des terrasses ou "meskats" irriguées par des canaux captant le ruissellement sur les versants des collines.

Enfin dans la vallée, toute une série d'aménagements permettent de valoriser les eaux d'épandage des crues ou l'exploitation de la nappe phréatique. (Voir fig. 4.42 et 4.43).

El Amami (1983), a pour sa part, classé les systèmes d'aménagements hydrauliques traditionnels en fonction des climats (voir fig. 4.44).

Dans la zone soudano sahélienne d'Afrique occidentale, la plupart des sols sont encroûtés en surface et donnent lieu à un ruissellement superficiel inacceptable sous ces climats semi arides d'autant plus que ce ruissellement emporte sélectivement les matières organiques et les nutriments des horizons superficiels.

Toute une série de techniques traditionnelles, de gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols peut être observée dans ces zones très diversifiées tant au niveau du bilan hydrique que du point de vue des ethnies.

Beaucoup de ces aménagements sont localisés sur le glacis en-dessous des collines rocheuses ou latéritiques utilisées comme parcours extensif du bétail, lequel fonctionne comme un impluvium produisant un ruissellement abondant.

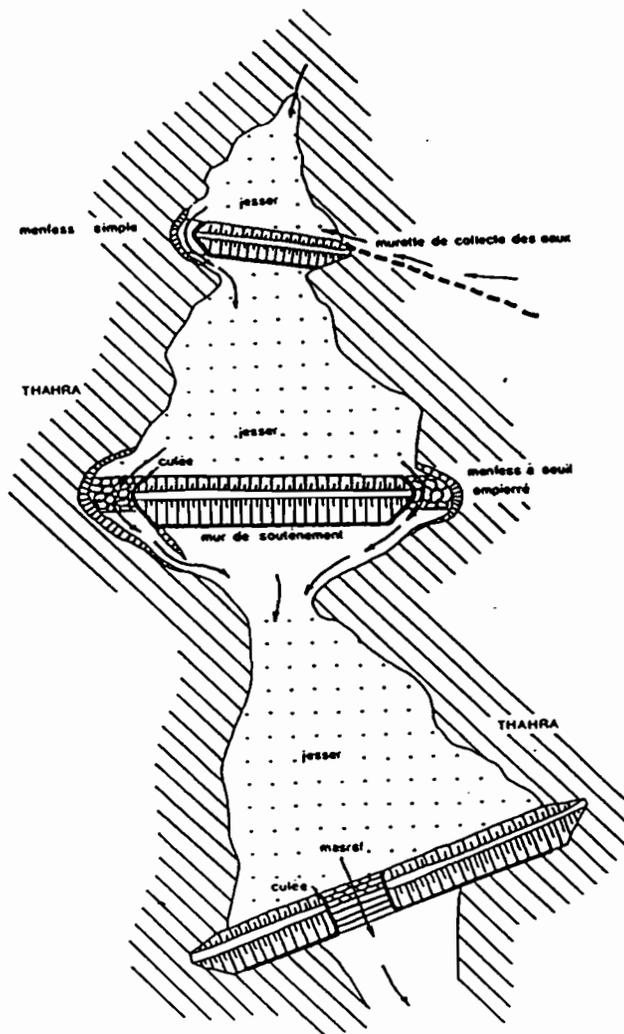


FIG. 4.41 - TABIAS ET DEVERSOIRS

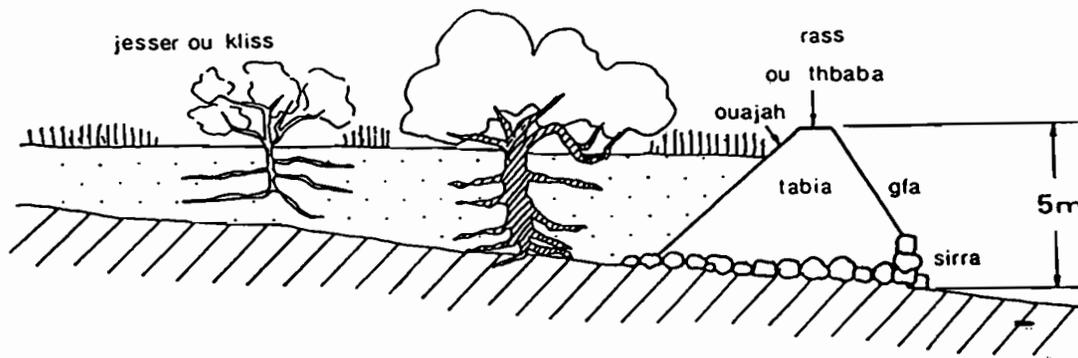


FIG. 4.40 - PROFIL D'UNE TABIA ET DE SON JESSER

D'après Bonvallot, 1986

137-916

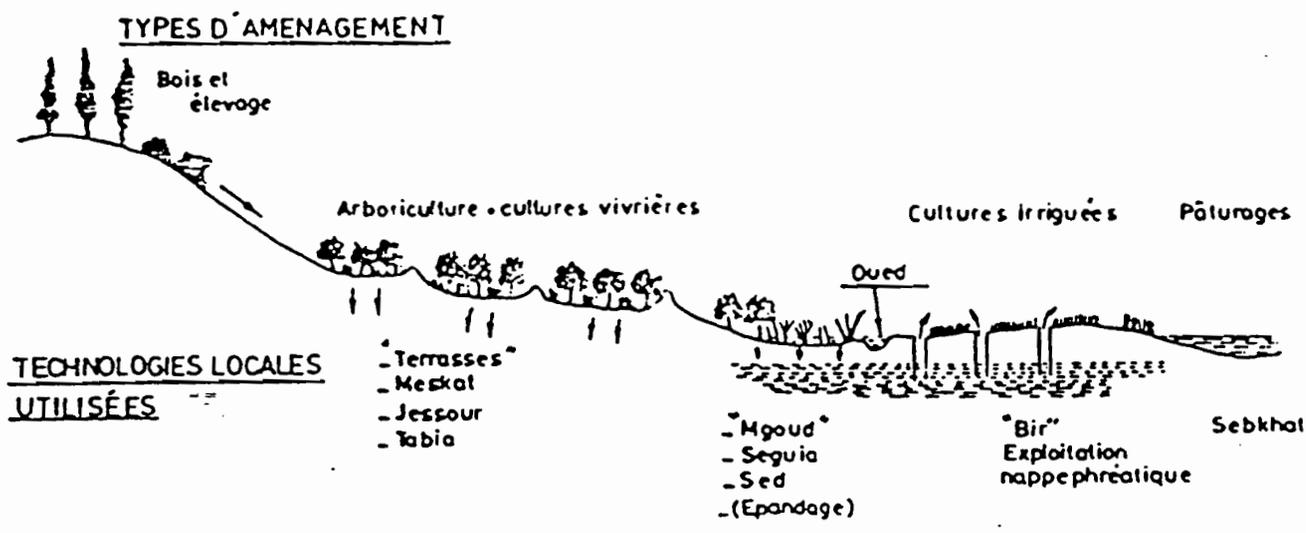


Fig: 4.42 TYPES D'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE LOCAL DE L'ESPACE AGRICOLE EN TUNISIE

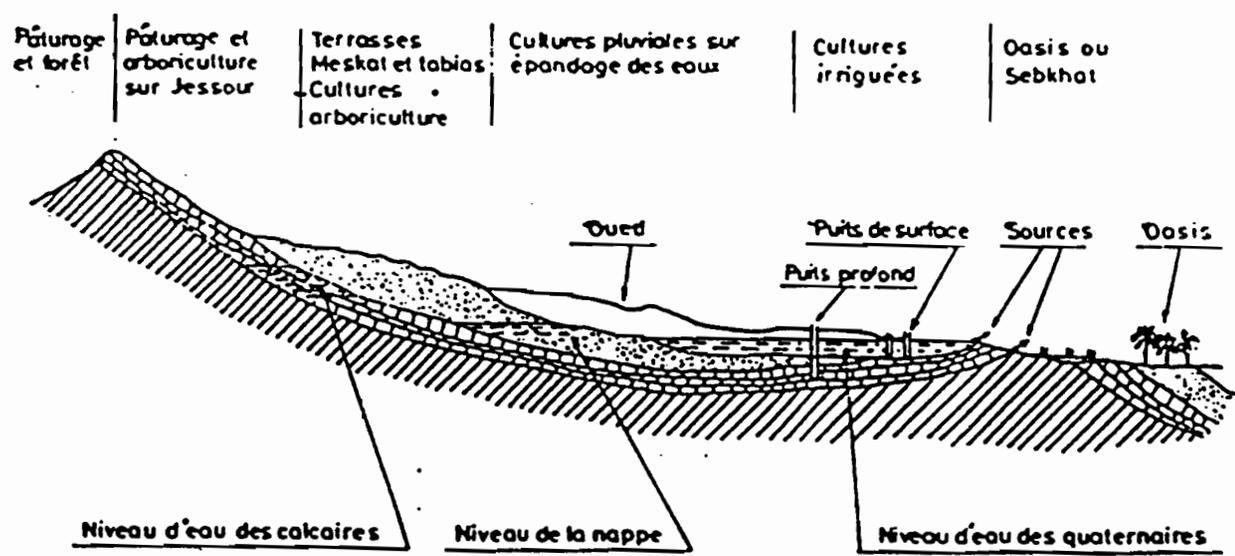


Fig: 4.43 AMENAGEMENT DE L'ESPACE RURAL MAGHREBIN EN FONCTION DES FACTEURS HYDRO-GEOLOGIEQUES (D'après GOSSELIN 1939)

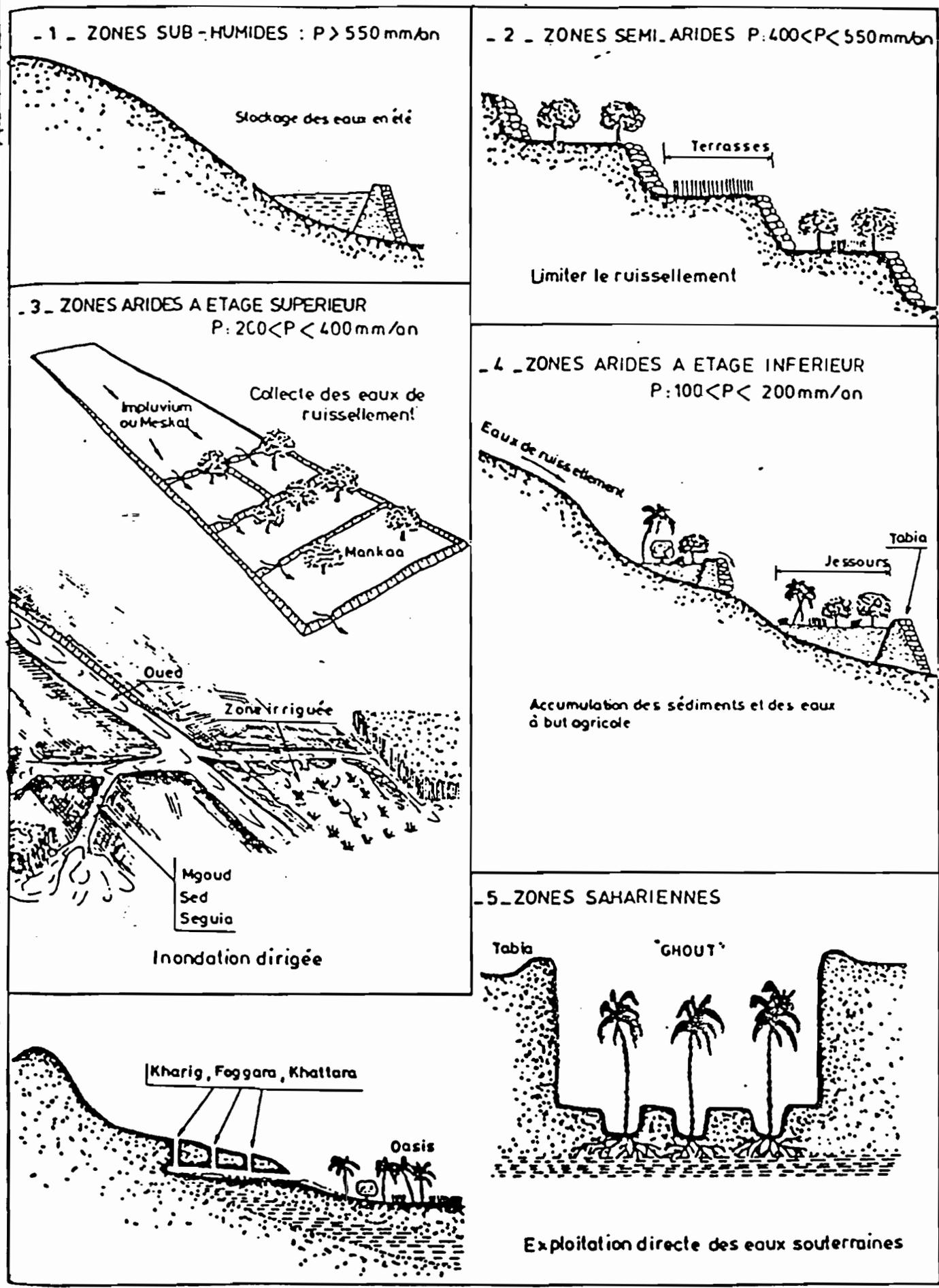


FIG. 4.44. CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYDRAULIQUES TRADITIONNELS EN FONCTION DES CLIMATS d'après EL AMARI (1973)

Le zaï est une méthode traditionnelle complexe permettant la récupération des sols dégradés sur les glacis sablo-limoneux qui allient la capture du ruissellement et la localisation de la fumure et de l'eau disponible dans des cuvettes avec la complicité des termites. Il existe de nombreuses variantes de zaï. Voir fig. 4.45 : collecte et stockage du ruissellement sur un versant.

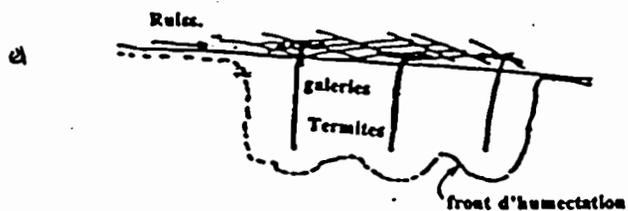
Fonctionnement du zaï : en saison sèche, le paysan creuse des cuvettes de 30 à 80 cm de diamètre, de 10 à 15 cm de profondeur, tous les 80 à 120 cm en quinconce, en rejetant la terre vers l'aval en croissant. "En se dépêchant au lever du soleil" (= signification de zaï en Moore) le paysan arrive à creuser 80 trous par jour : il faut 160 à 250 jours pour récupérer un hectare de terre dégradée (terre blanchie = zipellé). Le vent harmattan pousse dans ces trous diverses matières organiques qui sont bientôt attaquées par les termites.

Celles-ci creusent des galeries, percent la surface du sol et permettent aux premières pluies de s'infiltrer en profondeur hors d'atteinte de l'évaporation directe. De plus, certaines termites (*Trinervitermes*) tapissent les galeries de leurs déjections, source de nutriments pour les plantes. Deux semaines avant les premières pluies (15 mai à 15 juin), le paysan répand une à deux poignées de poudrette (1 à 2,5 t/ha de fumier) au fond des trous et les recouvre de terre pour empêcher que ces matières organiques sèches ne flottent et ne soient emportées par le ruissellement lors des premières grosses averses. Certains sèment en poquets avant les pluies, d'autres juste après la première averse, enfouissant une douzaine de graines de mil (si le sol est léger) ou de sorgho (si le sol est lourd) (à peu près 6 à 9 kg/ha de semence) à l'aide d'une petite houe et d'un coup de talon.

Les premières averses ruissellent sur les surfaces battantes (2/3 du terrain) : le ruissellement est capté dans les cuvettes qui stockent jusqu'à 100 mm d'eau, de quoi mouiller le sol en profondeur sur un mètre. Les graines vont germer, bousculer ensemble la croûte de battance et envoyer des racines en profondeur par les galeries de termites qui leur livrent les réserves hydriques du sol et des nutriments. Grâce à la concentration de l'eau et des nutriments, on peut espérer 800 à 1000 kg de céréales dès la première année pour ces sols dégradés sur lesquels rien ne poussait, pas même les adventices. C'est même un avantage du système, le sarclage est réduit à la surface des cuvettes, soit 1/3 de la surface).

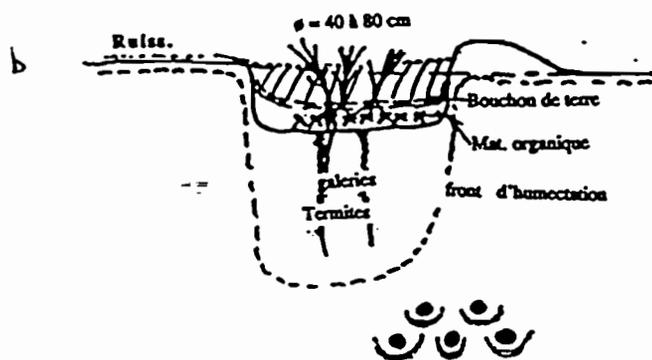
La deuxième année, ou bien le paysan a le temps de creuser de nouvelles cuvettes (et d'apporter du fumier) entre les premières, ou bien il resème dans les premières cuvettes, il ne remet pas de fumier, sinon tous les deux ans.

FIG. 4.45 - COLLECTE ET STOCKAGE DU RUISSELLEMENT SUR VERSANT



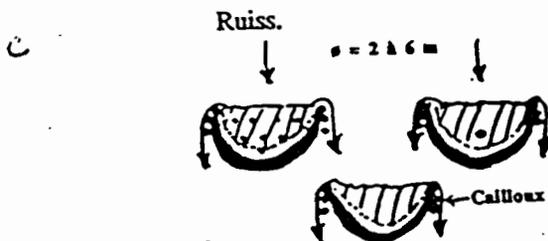
Pallasse (herbes + branchettes)

- * les termites viennent manger les M.O.
 - ouvrent des galeries
 - favorisent la pénétration du ruissellement
 - répartissent les nutriments
- * améliore l'infiltration et la fumure



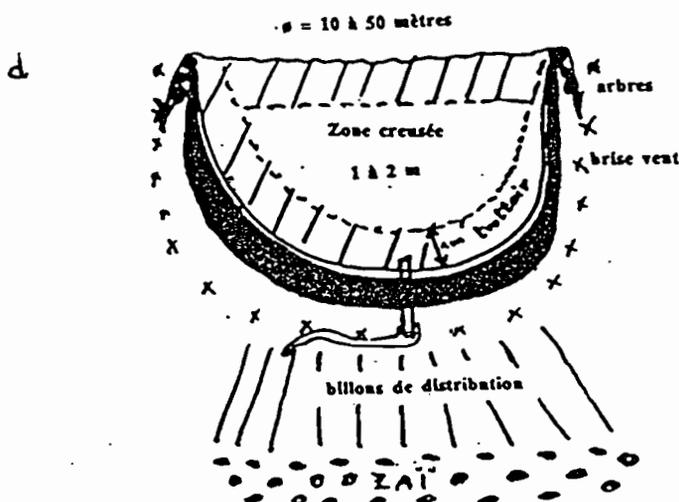
Zai (pitting + manure + termites)

- * cuvette de 30-80cm Ø, 15 cm en profondeur, terre en aval en croissant → capte le ruissellement sur bassin 3/1
- * concentration eau + M.O. + nutriments → rendement > 800kg/ha sur sol épuisé
- * action ++ des termites sur infiltration. Grâce aux galeries l'eau infiltrée est à l'abri de l'évaporation directe.



Demi-lunes (micro catchment 1/5 - 1/10)

- * sur glasis limoneux, capture du ruiss. sur 10-20m² pour irriguer
 - des céréales
 - 1 ou 2 arbres
- * protéger l'extrémité des diguettes par 3 cailloux pour éviter l'érosion lors du débordement.



Boullis = citerne creusée au bas d'un glasis à la limite de parcours.

- * digue construite avec la terre extraite progressivement de centre du croissant
- * les sédiments fins apportés avec le ruissellement colmatent le fond de la citerne
- * 3 objectifs :
 - alimentation en eau du bétail (filtrer)
 - irrigation d'appoint d'un jardin précoce (1000 m²)
 - les sédiments fins peuvent être récupérés → briques ou terre organique.

A la récolte, il laisse sur place les tiges coupées à 1 m de haut et déplace les souches au semis (= restitution organique directe). Au bout de 3 à 5 ans, toute la surface a été remuée et fumée et le sol s'assouplit assez pour être labouré normalement. Des terrains ainsi mis en valeur peuvent livrer des récoltes pendant plus de 30 ans.

Une variante forestière semble particulièrement intéressante. Dans la poudrette (fumier non fermenté) subsistent quantités de graines forestières prêtes à germer après le passage dans le tube digestif des chèvres. Lors du sarclage, certains paysans conservent deux plantules forestières toutes les trois cuvettes, lesquelles plantules profitent de l'eau et de la fumure destinée aux céréales. A la récolte, les tiges de sorgho sont coupées vers 1 m et protègent ainsi le sol de l'érosion éolienne et les jeunes plantules de la vue des chèvres. La culture de céréales continue indéfiniment mais tous les cinq ans, les plants forestiers sont taillés pour fournir des perches et du bois de chauffe. Ainsi sans grillage, il se met en place une association agroforestière susceptible de reconstituer à terme les parcs à Acacias albida et autres légumineuses capables de maintenir la production de céréales, de fourrage aérien et de bois. Ce zaï forestier peut aussi être utilisé pour implanter des haies vives.

Le problème principal c'est le travail très dur en saison sèche qui exige 160 à 250 h/jour à raison de 4 heures par jours ouvrables. Donc on ne peut récupérer qu'un demi hectare par actif et par an, surtout si l'on est obligé d'entourer la parcelle d'un cordon de pierres pour briser l'énergie de la nappe ruisselante. En préparant le terrain en décembre, lorsque les boeufs sont bien nourris des résidus de culture, les températures sont encore assez fraîches et les sols pas encore si durs, un sous solage croisé aux boeufs peut réduire de moitié les temps de travaux. Autre difficulté, la disponibilité en fumier. La majorité des paysans peuvent disposer d'une à cinq tonnes de poudrette ou de compost. Dans le cas contraire, des branchages et autres résidus organiques peuvent servir à attirer les termites. Le rôle positif des termites n'est pas apprécié de la même façon par tous les paysans. Certains les craignent et préfèrent recycler la biomasse par l'usage de fumier ou de compost. Cependant, il faut noter que sous terre on ne voit pas la consommation du fumier par les termites, alors que celles-ci sont au moins aussi actives sous terre que dans le paillage au-dessus du sol.

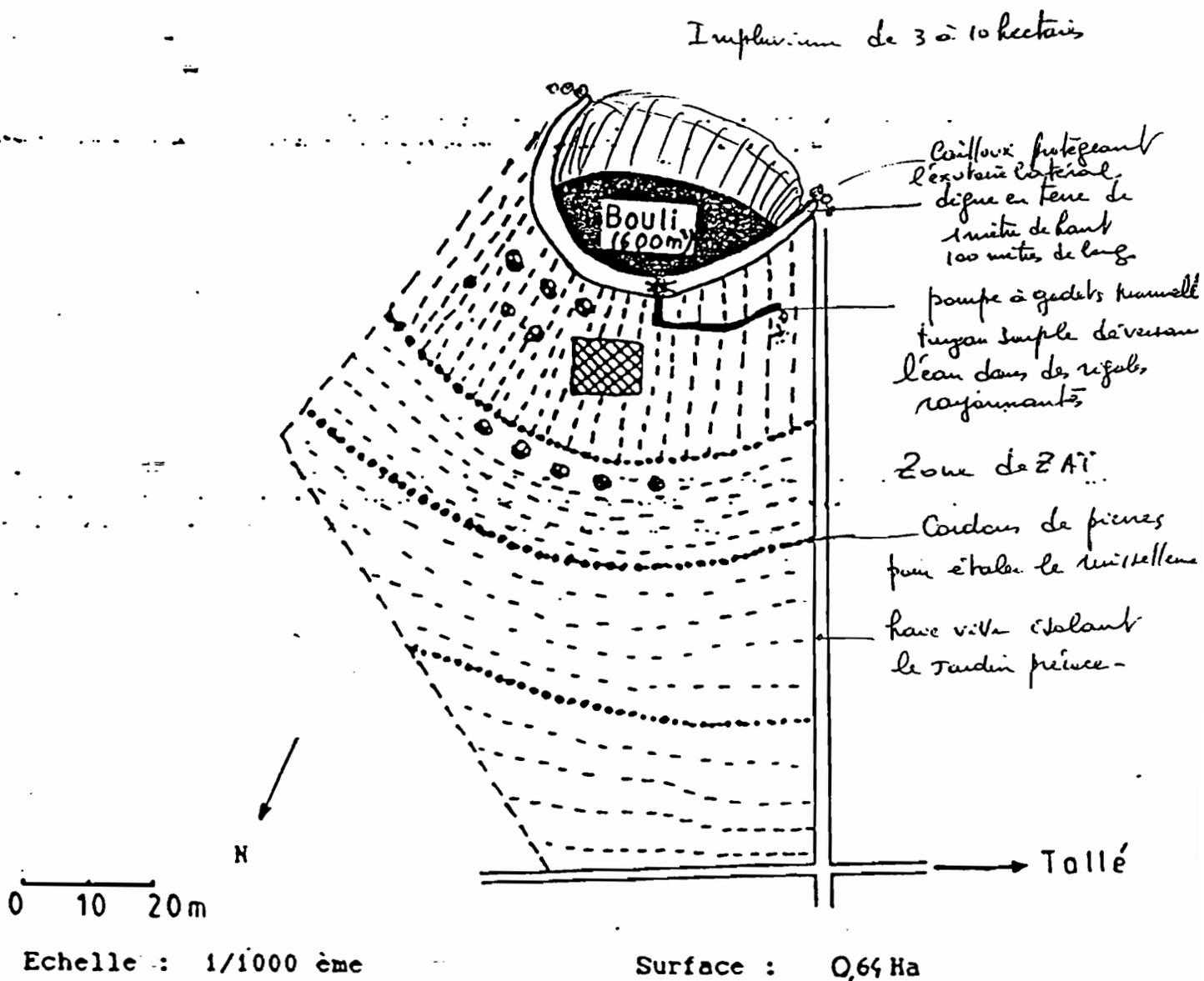
2° Les demi-lunes (Voir fig. 4.45 et 4.48). Sur les glacis limoneux qui se dégradent très vite, une fois la végétation naturelle dégradée, on peut capter le ruissellement de 10 à 20 m² en dressant des diguettes en forme de demi-lunes de 2 à 6 m de diamètre pour cultiver des céréales ou quelques arbres. A Ouramiza (au Niger), la demi-lune creusée de 20 cm a une surface cultivée de 6 m² pour une surface de réception

de 16 m² (les demi-cercles de 2 m de rayon sont distants de 4 m sur la courbe de niveau et 4 m de la courbe voisine) (313 demi-lunes par hectare sont formées pour un coût estimé à 45.000 F CFA = 80 h/j/ha). On peut aussi creuser des cuvettes de 3 x 06 x 0.6 = 1 m³ drainant 10 m², au fond desquelles on plante un ou deux arbres (ex. : projet F.A.O. de la Vallée de Keita). Le risque de colmatage de ces micro bassins est grave pour le mil et certains arbres à cause de la charge solide du ruissellement qui forme rapidement des croûtes peu perméables qu'il faut casser par sarclages et binages réguliers. L'apport de paille ou de branches permettrait de capter du sable éolien pour maintenir une bonne infiltration. L'apport de fumier pourrait aussi aider à maintenir la capacité d'infiltration.

3° Les citernes ou boulis (voir fig. 4.45 et 4.46) creusées dans le glacis à la limite du parcours (glacis gravillonnaire) et du bloc de culture (glacis limoneux). Certains paysans Mossi ont creusé progressivement des trous d'eau, citernes ou boulis de 1 à 2 m de profondeur et avec la terre extraite, on construit une digue en forme de croissant s'étirant sur une centaine de mètres. Dès les premières pluies, ils disposent de 100 à 500 m³ d'eau de ruissellement assez chargée, soit pour irriguer un petit jardin qui, bien fumé et irrigué à la raie et au zaï peut produire deux cultures : du maïs précoce de soudure et des pastèques tardives. Elles peuvent aussi servir à alimenter en eau le bétail qui perdra moins de poids en fin de saison sèche s'il n'a pas à courir jusqu'au point d'eau dans la vallée. Cet aménagement qui améliore surtout la sécurité à l'époque de la soudure, demande beaucoup de travail, mais il peut s'exécuter progressivement au cours de plusieurs saisons sèches avec l'aide d'une équipe de voisins. On pourrait réduire le travail en plaçant le boulis en tête de ravine, là où beaucoup de ruissellement se rassemble avant que les transports solides soient importants. On résoudrait par la même occasion, le problème de l'aménagement des ravines qui se stabiliseraient probablement naturellement en aval des boulis du simple fait de la réduction des débits de pointe. Il existe maintenant des pompes manuelles (ex. : Etsher 2000 à Ouagadougou) capables d'élever 10 m³ d'eau par jour à 1 m de hauteur.

Danger : l'érosion sur le glacis amont risque de combler progressivement la mare. Il faut donc prévoir son aménagement pour retenir les terres en place (cordons de pierres, bandes enherbées) sans trop réduire le ruissellement. Une autre solution consiste à récupérer les sédiments frais lorsque les eaux baissent pour en faire des briques qui sècheront au soleil pendant toute la saison sèche. La digue risque de glisser dans la mare si on ne préserve pas un trottoir (environ 1 m de large) ou elle risque d'être dégradée par le bétail ou par la pluie. Il peut être utile de prévoir un péret (ou des herbages) sur la face amont de la digue, de bien la tasser et de la protéger du bétail par une haie vive d'épineux. Il ne doit pas être permis au bétail de patauger dans la mare à cause des risques de contagion par une bête malade. Il faut aménager à l'aval un abreuvoir alimenté

FIG. 4.46- CITERNE (bouli en Mooré) ET PARCELLE SERVANT à TESTER L'IRRIGATION CONTRE-ALEATOIRE D'UN JARDIN (Dugue, 1986)



Légende :

- ▤▤▤▤ Culture de maïs sur billons
- ▨▨▨▨ Culture de mil en courbe de niveau
- Cordon pierreux
- Manguier planté en juillet 1988
- ▣▣▣ Hangar de stockage des résidus de récolte
- ⚙ Pompe

par un tuyau souple siphonnant l'eau jusqu'à un filtre (touque remplie de lits successifs de sable et de charbon de bois). Pour éviter l'érosion des extrémités des digues en cas de débordement, il faut protéger la digue par quelques blocs de latérite et des touffes d'herbe pérenne (Andropogon, etc...).

4° Les digues de terre sous impluvium.

Le ruissellement provenant de l'impluvium formé par des collines ou par le parcours, peut aussi être capté par une digue en terre et irriguer un champ aménagé en cordons de pierres. Pour que ce supplément d'eau, distribué pendant l'averse sur un champ qui tend déjà à ruisseler par lui-même, ne provoque pas de ravinement, il faut réduire le rapport surface impluvium sur champ cultivé, à moins de trois dans la zone des 400 à 600 mm de pluie et ralentir la nappe ruisselante à moins de 25 cm/sec. à l'aide d'une série de cordons pierreux disposés tous les 20 m. Voir la fig. 4.47 : Agriculture sous impluvium à Bossomboré, village de Ziga près de Ouahigouya au Burkina (d'après Bedu, 1986). Voir aussi les études sur l'efficacité des aménagements en cordons pierreux sur sols ferrugineux sableux à Bidi par Lamachère, Serpantié et leurs collaborateurs. Ce dernier mode de gestion des eaux de ruissellement est cependant délicat car en année sèche, l'impluvium risque d'être insuffisant pour nourrir les grains et en année humide, les apports d'eau trop abondant risquent de réduire la production par engorgement temporaire du sol (Hudson, 1990).

Au Kenya dans le district Turkama, Finkel (1986) a élaboré un modèle simple pour estimer le rapport entre la surface d'impluvium et le champ cultivé :

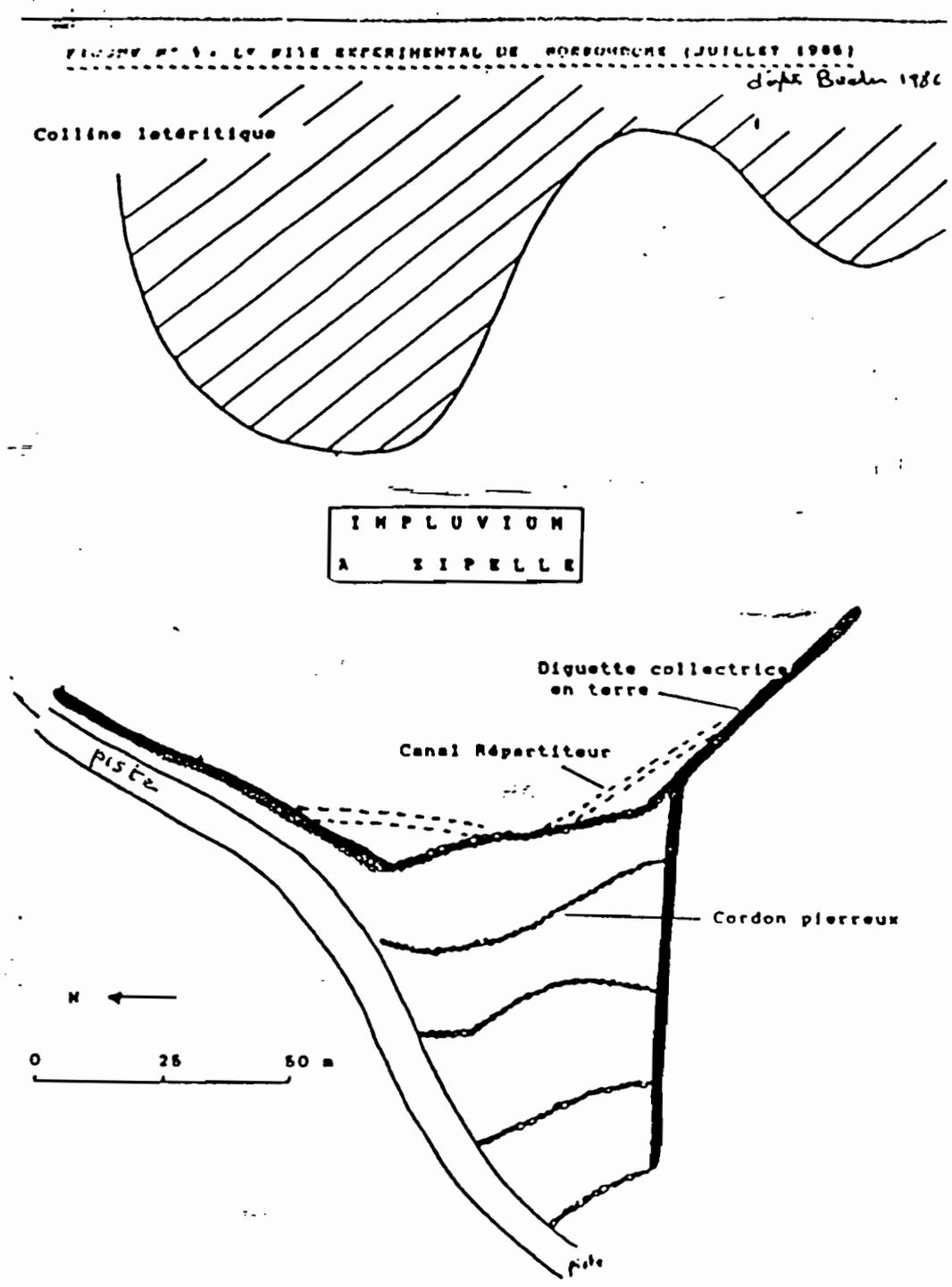
$$\frac{\text{Surface impluvium}}{\text{Surface cultivée}} = \frac{\text{besoin en eau de la culture - pluie annuelle moyenne}}{(\text{pluie moyenne ann.} \times \text{coeff. de ruissellement}) \times \text{efficience de l'eau pour la culture}}$$

Dans cette région semi aride du Kenya, ce rapport ($P < 200$ mm) varie entre 15 et 40 pour les cultures de sorgho et diverses légumineuses (d'après Reij et al., 1988). Dans la zone des 600 mm autour de Ouahigouya, ce rapport serait de 1 à 3.

5° Les micro bassins (Negarim microcatchment).

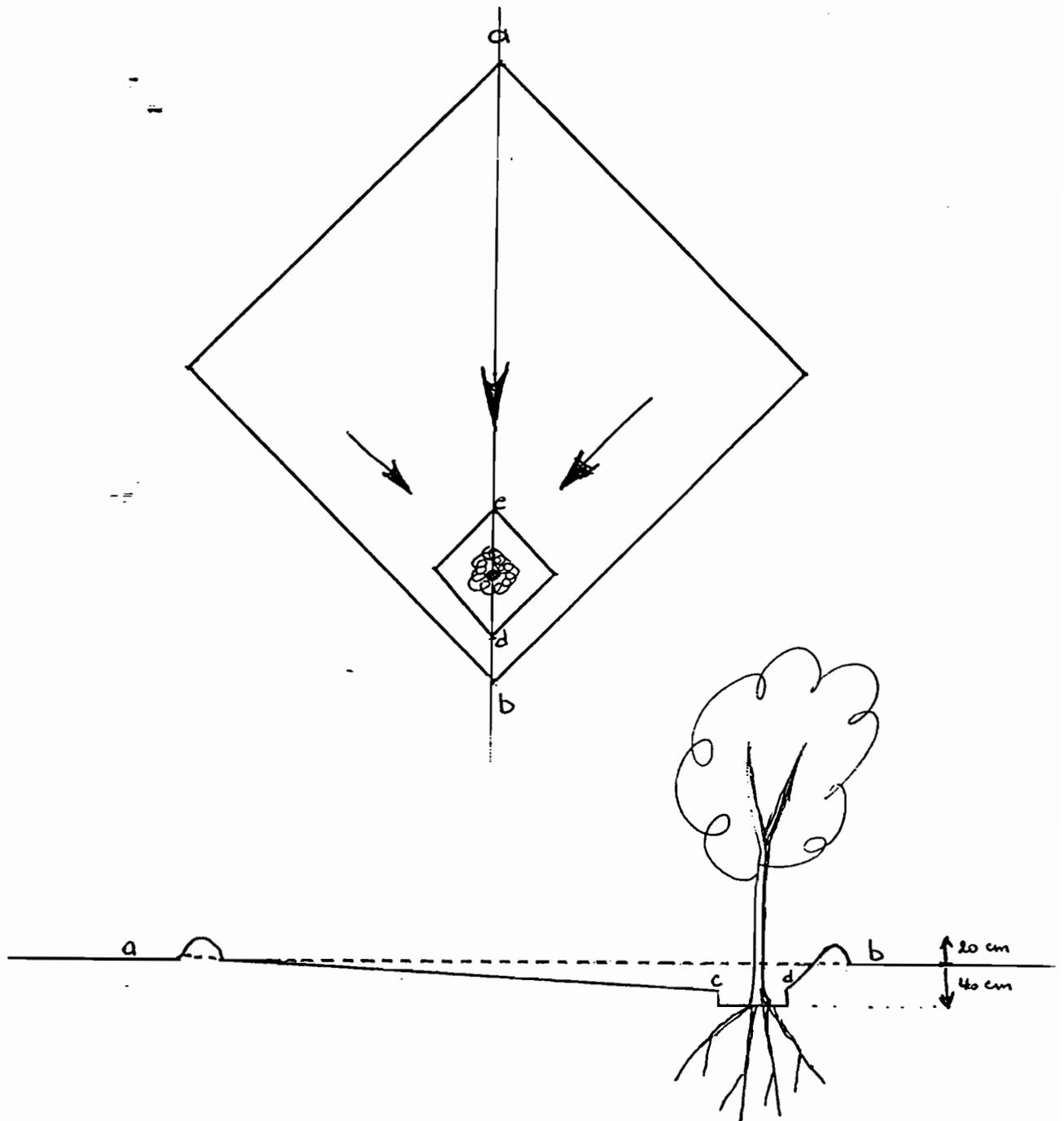
Le système probablement le plus connu d'impluvium permettant de récolter de l'eau sur des courtes pentes pour irriguer une culture d'arbres, est certainement les micro bassins. L'élément de base est une petite excavation formant un bassin d'infiltration et une bordure formée d'une diguette en terre de 20 cm de haut tandis que le bassin aurait 40 cm de profondeur. Les diguettes peuvent avoir une forme en V ou en demi lune. En

FIG. 4.47- AGRICULTURE SOUS IMPLUVIUM : site expérimental de Bossombore (Ziga près de Ouagadougou : Burkina Faso)



Rapport Impluvium / champ cultivé doit être réduit à < 3 (d'après Bedu, 1986).

FIG. 4.48 - PLAN D'UN MICRO BASSIN (d'après Evenari, 1968)



Israël, dans un nouveau verger, la zone d'infiltration serait de l'ordre de 4 x 4 m, tandis que l'impluvium aurait 3 à 6 fois plus de surface. Voir fig. 4.48 : Plan d'un micro bassin (d'après Evenari, 1968).

6° L'aménagement en planches collectant le drainage dans une citerne (vertisol) (fig. 4.50)

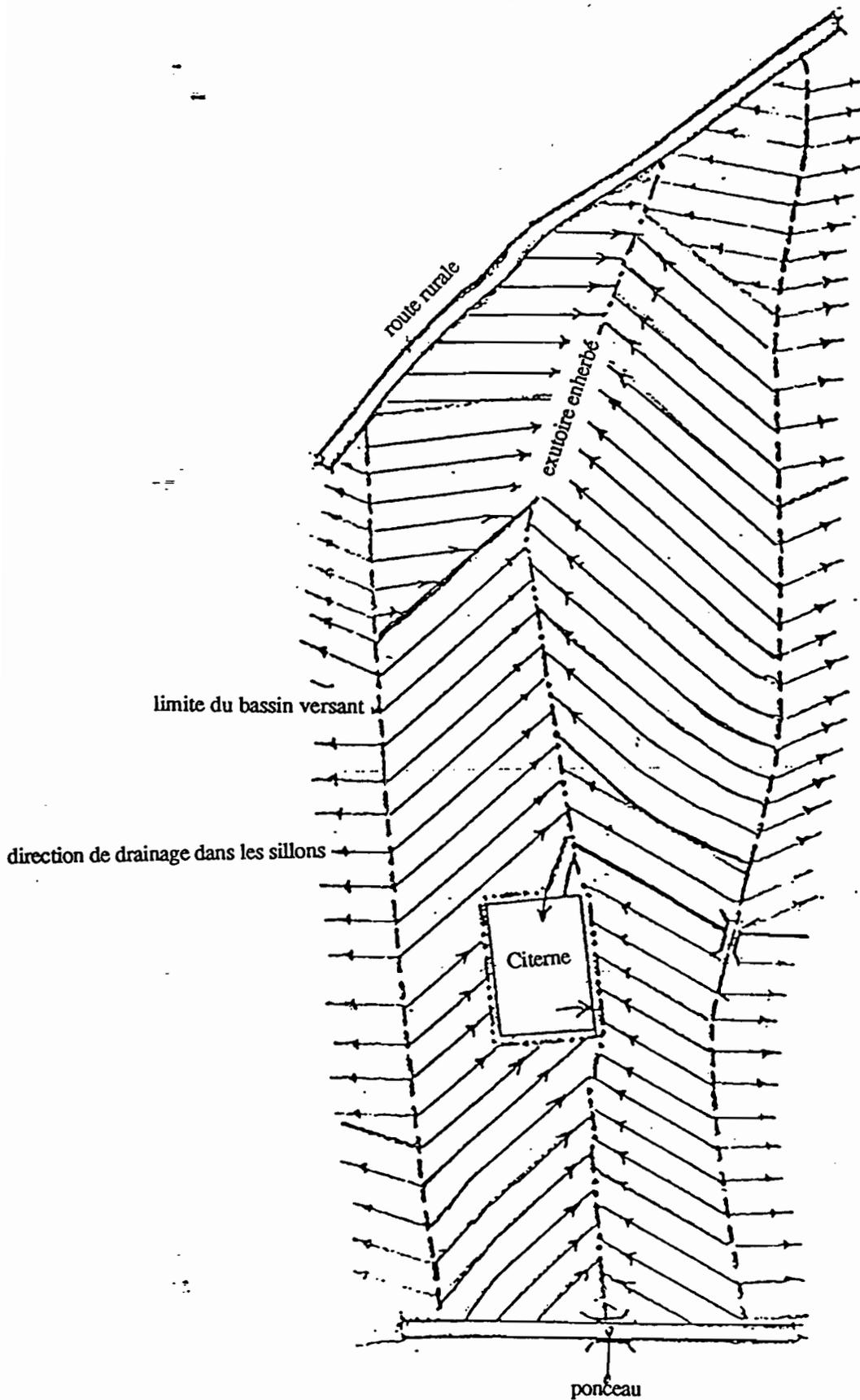
Aménagement de bassins versants sur vertisols en Inde (schéma d'ICRISAT d'après Kampen et Krantz, 1974).

Les vertisols sont des sols très argileux et assez fertiles chimiquement, mais extrêmement difficiles à cultiver en saison des pluies. A cette époque en effet, ils sont boueux et manquent de portance. Par contre, il est possible de les labourer en saison sèche un mois après la fin des pluies et de dessiner sur les champs un ensemble de planches de 1,50 m de largeur séparées par des petits sillons en pente légères (0,5 %) qui vont ramener les eaux de drainage vers un exutoire, lequel aboutit à une citerne creusée dans la terre (voir la figure 4.54). Ce système permet une double culture : d'une part, une culture de saison des pluies grâce au drainage permet le développement de sorgho sur des planches préparées et semé avant le début des pluies et d'autre part, après la saison des pluies, le sol s'est tellement gorgé d'eau, qu'il a une réserve d'environ 400 mm d'eau lorsque le vertisol a une épaisseur de 1 m. Le réservoir qui récupère les eaux de ruissellement contient quelques centaines de mètres cubes et ne peut servir qu'à produire une irrigation d'appoint sur une partie des champs pour compenser l'arrêt brutal des pluies durant une saison ou à la fin de la saison. Ce système, mis au point par l'ICRISAT dans la région de Hyderabad au centre de l'Inde a permis de doubler les revenus des paysans mais en exigeant d'eux un travail considérable à une époque où ceux-ci préfèrent concentrer leurs efforts sur les rizières de bas-fond. Ce type d'aménagement ne convient que pour les sols vertiques riches en argile gonflante.

Conclusions - En observant les modes de gestion traditionnelle des eaux dans chaque région, on pourra choisir des méthodes mieux adaptées d'une part, aux conditions écologiques locales sur une longue période, et d'autre part aux habitudes des populations concernées.

Il est probable que sous l'effet de la dégradation des sols par la culture, on aboutisse à la conclusion qu'il n'est pas possible d'éviter le ruissellement. Avant donc de mettre en place des structures de lutte antiérosive, il est indispensable d'étudier l'origine du ruissellement dans les différents cas de culture observés dans le paysage local. L'attitude habituelle de l'ingénieur est de partir de l'hypothèse que les pluies les plus intenses ne peuvent être infiltrées et par conséquent, de négliger pour une bonne part les techniques culturales permettant d'augmenter ces infiltrations. Or, pour répondre à l'attente des paysans qui est d'augmenter l'efficacité, la

FIG. 4.50 - AMENAGEMENT D'UNE PARCELLE EN PLANCHES DRAINEES PAR UN SILLON VERS UN EXUTOIRE ENHERBE ET UNE CITERNE SUR UN VERTISOL DU CENTRE ICRISAT DE HYDERABAD. D'après Kamper et Krantz, 1974.



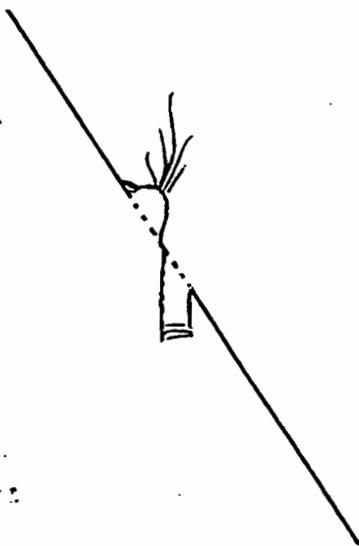
rentabilité de leurs travaux, donc les rendements, il faut prévoir une amélioration des conditions d'alimentation hydrique et minérale des cultures et par conséquent, de favoriser au maximum l'infiltration totale des pluies (sauf si dans les cas particuliers de montagne, cette infiltration provoque des risques particuliers de glissement de terrain). Il faut encore se rappeler que les techniques culturales telles que le billonnage cloisonné et le paillage ou la culture sous une couverture permanente vivante ou morte, entraînent une infiltration quasi totale des eaux de pluie et dominant l'énergie des eaux de ruissellement en nappe. Dans ce cas, il n'est donc pas souhaitable d'investir dans la mise en place de structures antiérosives coûteuses et peu efficaces.

4.8.4.2. Les structures d'infiltration totale.

Celles-ci sont utilisées dans deux cas : lorsque les pluies suffisent à peine à assurer l'évapotranspiration des cultures, ou dans les milieux humides très perméables.

a) Les fossés aveugles avec talus enherbés du Rwanda (ou le fanya juu du Kenya).

Au Rwanda et Burundi, les Belges ont proposé jadis, vers les années 1935, de creuser des fossés hysohypes sur des pentes de moins de 20 % où la couverture pédologique ferrallitique est profonde et très perméable et où les risques de glissement de terrain sont assez réduits.



Pour éviter que les eaux de ruissellement captées par les fossés ne se rassemblent en un point bas (par erreur de réalisation ou fragilité locale) et ne creusent des ravines profondes, des cloisons de 50 cm d'épaisseur séparent les segments de fossés de 10 m de long et 80 cm de profondeur et de largeur. La terre doit être rejetée vers l'amont et fixée avec de grandes herbes pour créer une terrasse progressive concave. (*Pennisetum purpureum*, *Setaria splendida* ou *Sphacelata*, *Tripsacum laxum* et Vetiver).

Avantages : les fossés aveugles divisent bien les pentes trop longues en provoquant le stockage du ruissellement et des sédiments, ce qui peut être intéressant dans les zones sèches

; ils favorisent aussi la formation de terrasses progressives si on rejette la terre et les sédiments vers l'amont et qu'on protège le talus avec des herbes fixatrices.

Ces fossés rechargent la nappe et humectent les environs permettant la plantation de bananiers et autres arbres exigeants en eau à proximité du fossé.

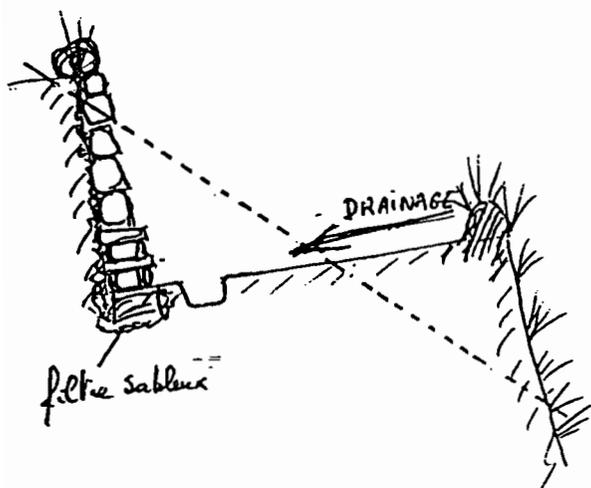
Inconvénients : cette technique est limitée à des sols profonds perméables et à des pentes de moins de 20 % (Tondeur, 1950).

- Or on a généralisé leur usage dans des conditions impropres (sols peu épais sur schistes ou sur granit) et abandonné leur entretien : d'où des ravinements et glissements de terrain .
- Cette méthode nécessite 300 h/j/ha lors du creusement et 20 à 50 h/j/ha à l'entretien sans que les paysans ne constatent clairement d'amélioration de la production.
- La surface occupée par les fossés (1 m tous les 10 à 20 mètres) entraîne une perte de 5 à 10 % de surface cultivable sans augmenter beaucoup la production des bandes cultivées.
- Si la couverture pédologique est peu épaisse (sur les schistes à mica ou des cendres volcaniques sur granit), ces fossés augmentent les risques de glissement de terrain en accélérant l'accès de l'eau au plan de glissement. Ces fossés court-circuitent l'avancement du front d'eau à travers la couverture pédologique.
- Si les sols sont peu perméables ou les fossés trop petits, non entretenus et encombrés de sédiments, le ruissellement déborde en créant des ravines qu'on voulait justement éviter.
- Les talus verticaux sont souvent mal stabilisés à cause du manque d'entretien des bandes enherbées et surtout du surcreusement par les ouvriers qui préparent les champs en aval.

Proposition : pour augmenter la stabilité de ces talus, il faut les retailler, faire glisser la partie haute et humifère avec les herbes sur l'entaille stérile non couverte. On a pu observer au Burundi que ces talus inclinés sont alors un lieu d'accumulation privilégiée d'eau, de terre et de nutriments qui peut être protégé et valorisé d'une part par la production fourragère intensive du talus, d'autre part par la plantation d'arbres qui vont drainer le pied du talus, réduire les risques de glissement et enfin par des haies vives ou des arbustes fruitiers retaillés chaque année, pour le maintien du haut du talus.

La plantation de hauts arbres en haut du talus risque d'ébranler les talus lors des grands vents. Actuellement, on a tendance à abandonner les fossés, à y installer un sentier d'exploitation ou à transformer ceux qui existent en compostières et y planter des bananiers (Roose, Burundi, 1990).

b) Gradins ou terrasses méditerranéennes (bench terracing).



On observe le plus souvent les gradins dans les montagnes autour du bassin méditerranéen, mais aussi dans les Andes du Pérou, à Bali, en Indonésie et en Chine, là où la terre plane manque, où la population est dense ou menacée par un envahisseur comme les Dogons au Mali, là où le travail est obligatoire ou très bon marché, et là où l'on peut irriguer et sortir des produits de haute valeur ajoutée (ex. : les oeillets de Nice, les fraises en Espagne et en Lozère).

Les gradins sont formés d'un talus subvertical renforcé par des pierres ou par des herbes et d'une terrasse en pente douce inversée avec possibilité d'irrigation et de drainage de la pente en long.

Avantages :

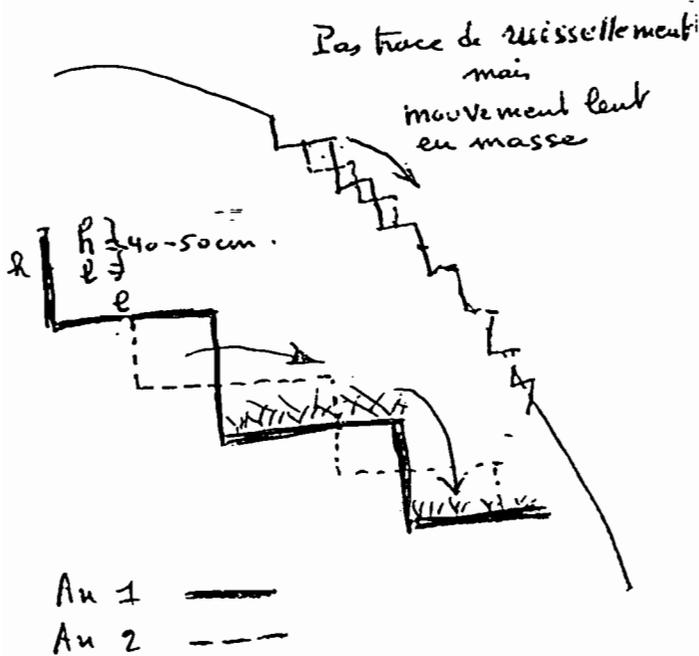
- Les gradins suppriment la pente et l'érosion en nappe,
- il permettent d'investir et d'améliorer la productivité des terres sur forte pente,
- il augmente l'eau disponible pour les plantes,
- et permet d'irriguer en captant les eaux de montagne et le ruissellement sur les talus.

Inconvénients :

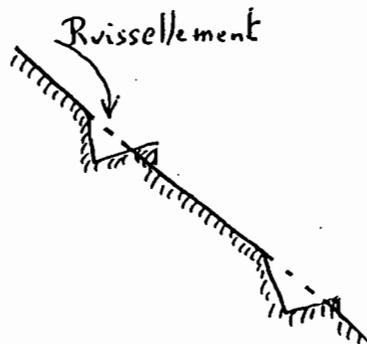
- C'est un aménagement extrêmement coûteux lors de la formation, qui exige 500 à 800 h/j pour aménager un hectare et exige ensuite l'entretien des talus,
- qui augmente les risques de glissement de terrain car il favorise l'infiltration près de la roche ; il n'est donc pas possible de l'installer sur des schistes ni sur des gneiss, ni sur des sols peu épais, ni sur des zones à fortes fréquences de secousses sismiques.
- Après cet aménagement, il faut restaurer la fertilité du sol par apport massif de fumier, de chaux et de phosphore pour voir les rendements doubler ou tripler après quelques années. Les talus n'étant pas verticaux, 20 à 50 % de la surface ne sont pas cultivables mais peuvent toutefois produire du fourrage.

- On augmente les risques de lixiviation des nutriments solubles en réduisant le ruissellement de surface.
- Une bonne partie de l'horizon humifère est concentrée près des mottes qui forment le talus ; il faut donc restaurer la fertilité des sols avant d'en tirer profit.

Proposition : cette méthode est trop coûteuse pour être vulgarisée n'importe où et trop risquée sur les sols peu profonds et dans les zones à mouvements sismiques fréquents. Cette méthode n'est valable actuellement que si l'on veut faire de la culture mécanisée dans une station à pente moyenne de 15 à 30 %. Prévoir la disposition des chemins en aval des talus.



La méthode traditionnelle des micro terrasses en escaliers, directement dérivée de la méthode des gradins, consiste à creuser des marches de 50 cm de large que l'on va déplacer chaque année de 25 cm pour entretenir une surface rugueuse et enfouir la végétation qui pousse pendant la jachère. Cette méthode traditionnelle casse l'énergie du ruissellement sur les pentes pouvant atteindre 80 % mais elle n'arrête pas le glissement lent de la couverture pédologique vers le bas de la pente par l'érosion mécanique sèche. (Voir Rwehumbiza et Roose, 1991). (Hudson, 1973). Voir aussi les résultats d'érosion en Guinée dans Fournier, 1967.



Dans les zones sèches, il existe une variante où une partie seulement du versant est transformée en terrasse, qui récupère le ruissellement sur les talus, favorise la complète infiltration des eaux de pluie et la récupération du ruissellement sur les talus. Dans ces conditions, la majorité des pluies, petites et moyennes, s'infiltrent totalement dans la bande de sol cultivé. Mais il est prévu un système de drainage permettant l'évacuation des pluies excédentaires lors des averses exceptionnelles si dangereuses dans les régions méditerranéennes.

4.8.4.3. La diversion des eaux excédentaires.

Lorsque les eaux de pluie sont trop abondantes ou trop intenses pour être stockées ou infiltrées totalement dans le sol, on organise leur drainage dans des fossés, le long de diguettes, banquettes ou des terrasses de diversion pour récupérer les nappes ruisselantes avant qu'elles aient acquis une énergie suffisante pour raviner le versant. Ces eaux de drainage sont alors évacuées en dehors de la zone de culture vers des exutoires naturels ou des exutoires qu'il faut aménager, en leur permettant d'atteindre le niveau de base et la rivière sans créer de dégâts trop visibles.

Ce mode de gestion des eaux qui fut développé par Bennett en 1930 pour répondre au problème de dégradation des sols soumis à la mécanisation dans les plaines des Etats-Unis d'Amérique, pose malheureusement de nombreux problèmes pour son application dans les pays en développement.

Avantages : ces fossés permettent d'évacuer les excès d'eau hors des parcelles cultivées

Inconvénients : ces fossés constituent une perte de surface cultivable de 5 à 15 %.

L'érosion en nappe entre les structures peut rester vive. Dans ce cas, la terre sédimente dans les fossés (pente plus faible) et provoque des débordements et des ravines ruinant l'aménagement. Ces structures exigent un très bon levé topographique pour créer une pente de fossés croissant de 0,2 à 0,4 %. Ces structures sont chères à la réalisation ainsi qu'à l'entretien.

Ils nécessitent des moyens rapides d'entretien et de curage des fossés.

On constate deux sortes de risques de ravinement : sur les versants lorsque les fossés débordent et aux exutoires où se concentrent les eaux de tout un versant. On a donc déplacé le problème. On n'a pas réduit la dégradation du sol ni l'érosion en nappe entre les structures de lutte antiérosive. Ce système en Afrique, étant rarement correctement entretenu, aboutit nécessairement à un échec au bout de 4 à 10 ans et parfois moins, car les canaux chargés d'évacuer les eaux ruisselantes se remplissent de terre érodée entre les structures antiérosives. Ces canaux vont donc déborder lors des averses les plus importantes. (Voir la fig. 4.49 sur les inconvénients de la méthode des banquettes de diversion).

Conclusion :

On peut voir à la fig. 4.49 que cette méthode ne semble pas adaptée, ni à nos moyens (elle exige un gros travail d'installation et d'entretien ainsi que des équipes d'experts topographes), ni aux problèmes des paysans, car on perd 5 à 15 % de la

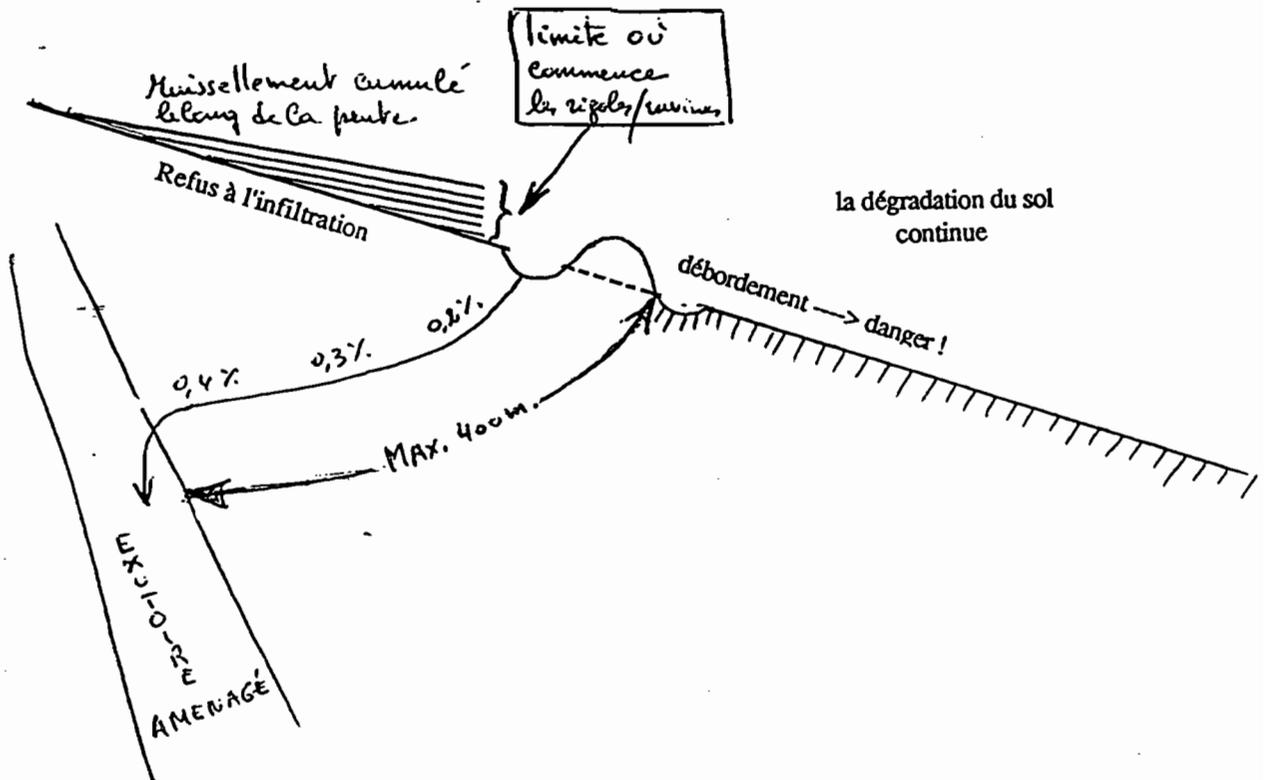
FIG. 4.49 - METHODE DES FOSSES, DIGUETTES OU BANQUETTES DE DIVERSION

L'érosion est fonction de :

- l'énergie des pluies
(constante tout le long de la pente)
- l'énergie du ruissellement (qui croît avec la pente
 $\approx \frac{MV^2}{2}$
 $E = f(\text{longueur}^n \times \text{pente})^m$)

Les banquettes :

- peuvent évacuer l'énergie du ruissellement accumulée
- ne peuvent pas réduire l'énergie des pluies ni la dégradation du Sol



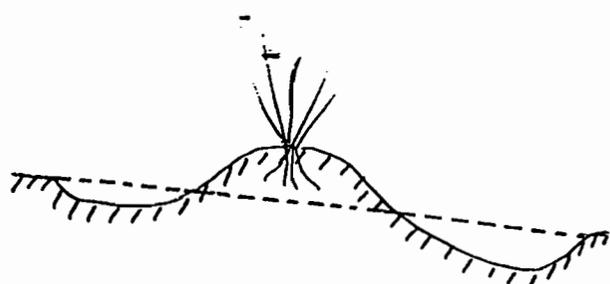
INCONVENIENTS

- 1 - Nécessité d'équipes de topographes experts (coût élevé)
- 2 - Important travail d'installation et d'entretien
d'où généralement { digues non protégées
canaux encombrés de sédiments
exutoires non enherbés ni protégés
(surcreusés ou ensablés)
- 3 - Perte de 5 à 15 % de la surface cultivée sans augmentation de rendement
- 4 - Perte d'eau et nutriments pour les champs cultivés en aval
- 5 - L'aménagement doit rompre s'il advient une pluie de fréquence inférieure à 1/10
- 6 - Variation de largeur des champs cultivés (mécanisation difficile)
- 7 - N'arrête pas l'érosion en nappe ni la dégradation
- 8 - Finalement, risques graves de ravinement s'il y a rupture des digues (1 fois en 4 à 10 ans)
- 9 - Accélération du temps de concentration des eaux :
 - gros débits de pointe
 - érosion marigots ou
 - ravinement régressif

TABLEAU 4.50 - Faible efficacité sur le ruissellement, l'érosion et les rendements de diverses cultures, des bourrelets de diversion et d'un système intensif motorisé de préparation d'un sol ferrugineux peu profond sur nappe gravillonnaire. Gampela à 25 km de Ouagadougou (Burkina Faso) d'après Roose - Piot, 1984.

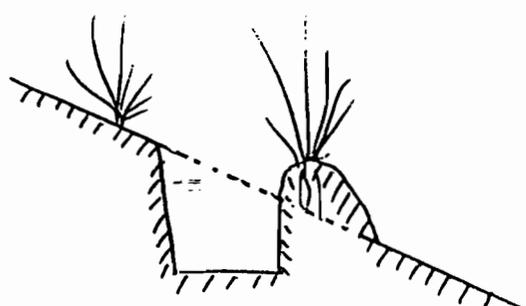
Surface des parcelles (env. 0,5 ha)	Ruiss. : KR %		Erosion t/ha/an	Rendem. t/ha/an
	Max 24 h.	KRAM.		
Bourrelets diversion dH = 40 cm + labour + sarclo binage └─ pente { cloisonné non clois.	31	4	1,4	
	37	20	3,4	1,12
Idem " mais billons // pente, non cloisonnés	45	24	5,9	1,03
Traditionnel Mossi = non labour Semis direct en poquets, puis 2 sarclages	43	23	4,1	1,05
Sol nu (standard USLE) (100 m ²)	70	40	16,0	-

FIG. 4.51 - DIVERSES STRUCTURES DE DIVERSION DU RUISSELLEMENT.



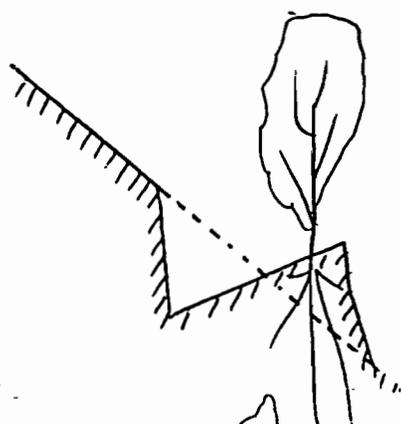
a) Bourrelet en terre de diversion

- Efficace sur pentes modestes de 1 à 8 %
- nécessite un entretien et fixation par les herbes et les arbustes ;
- nécessite la lutte contre rongeurs et fousseurs qui y trouvent une terre souple pour creuser leurs galeries ;
- pas adapté aux vertisols et autres sols se fissurant en saison sèche.



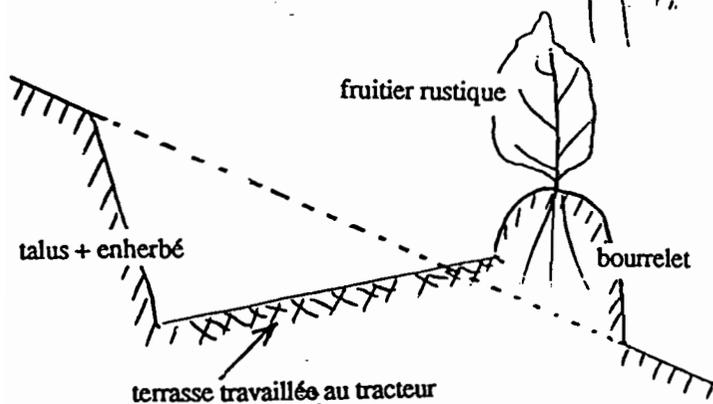
b) Fossé de diversion

- Efficace pour drainer les fortes pentes ;
- Permet parfois l'irrigation des prairies par débordement et cloisonnement ;
- Augmente les risques de glissement s'ils augmentent l'infiltration



c) Banquette forestière

- Adapté à la reforestation des zones de montagne dégradées ;
- permet un bon démarrage des plants
- demande en même temps l'implantation d'un sous-étage de plantes améliorantes (légumineuses, trèfle, Sylla)



d) Banquette algérienne

- Apport d'arbres fruitiers qui diversifient la production sur les terres agricoles ;
- Perte de 5 à 15 % de surface
- Pas d'augmentation des rendements ;
- 80 % d'échec sur les pentes > 40 % (Mathieu, 1975)
- Peu acceptée par les paysans car gêne l'exploitation mécanisée des terres ;
- Cas d'abandon des terres car aménagées par les Services de DRS de l'Etat (risques d'appropriation par l'Etat).

surface cultivée, on perd de l'eau, des nutriments et de la terre fine, on obtient une largeur variable des champs cultivés rendant difficile la mécanisation et finalement, on augmente les risques de ravinement grave et on réduit les temps de concentration des eaux provoquant des débits de pointe élevés dans les systèmes de drainage ainsi que la reprise d'érosion régressive au fond des rivières.

On peut voir au tableau 4.50, la faible efficacité sur le ruissellement, l'érosion et les rendements de diverses cultures effectuées derrière des bourrelets de diversion et sur un champ mené avec un système de labour intensif motorisé sur un sol ferrugineux tropical peu profond sur nappe gravillonnaire situé à Gampéla, à 25 km de Ouagadougou au Burkina Faso (Roose, Piot, 1984). Sur un glacis d'une pente de 0,7 % le Centre Technique Forestier Tropical a comparé entre 1967 et 1972 sur quatre parcelles le ruissellement, l'érosion et les rendements sur un sol nu standard, sur un champ traditionnel Mossi non labouré, semé en direct, en poquets, comparé à deux parcelles aménagées avec des bourrelets de diversion sur lesquels on a développé des méthodes intensives de labour, de sarclobinage et de billonnage, soit parallèle à la pente et non cloisonné, soit perpendiculaire à la pente et cloisonné certaines années. On constate que sur le sol nu, le ruissellement maximum observé lors des averses les plus importantes, atteint 70 %. Il varie de 37 à 45 % sur les terrains cultivés quel que soit le mode de culture, et atteint même 31 % lorsque le billonnage est cloisonné. Le ruissellement annuel moyen atteint 40 % sur les parcelles nues. Le couvert végétal réduit ce ruissellement entre 20 et 24 % quel que soit le système de culture ; seul le billonnage cloisonné réduit sérieusement le ruissellement (4 %). L'érosion sur ces faibles pentes peut atteindre 16 tonnes/ha/an sur sol nu. Elle est réduite au quart sur les sols cultivés mais on constate que l'érosion est plus forte sur les sols cultivés intensivement et billonnés dans le sens de la pente. Elle n'est significativement réduite que lorsque le billonnage est perpendiculaire à la pente et cloisonné. Enfin, il n'y a pas de différence significative dans les rendements, que l'on soit dans un système traditionnel sans labour ou dans un système moderne faisant intervenir de nombreuses techniques culturales ainsi que des structures antiérosives de diversion. Sur ces sols peu épais et peu gratifiants il ne semble donc pas intéressant d'investir dans le travail du sol, ni dans les diguettes de diversion. En effet, les réductions de ruissellement sont minimales et même si celles-ci s'avéraient intéressantes, les sols ne sont pas capables de stocker les eaux et les nutriments ainsi sauvés du ruissellement : les nutriments risquent d'être entraînés par les eaux de drainage.

4.8.4.4 - Les structures de dispersion de l'énergie du ruissellement.

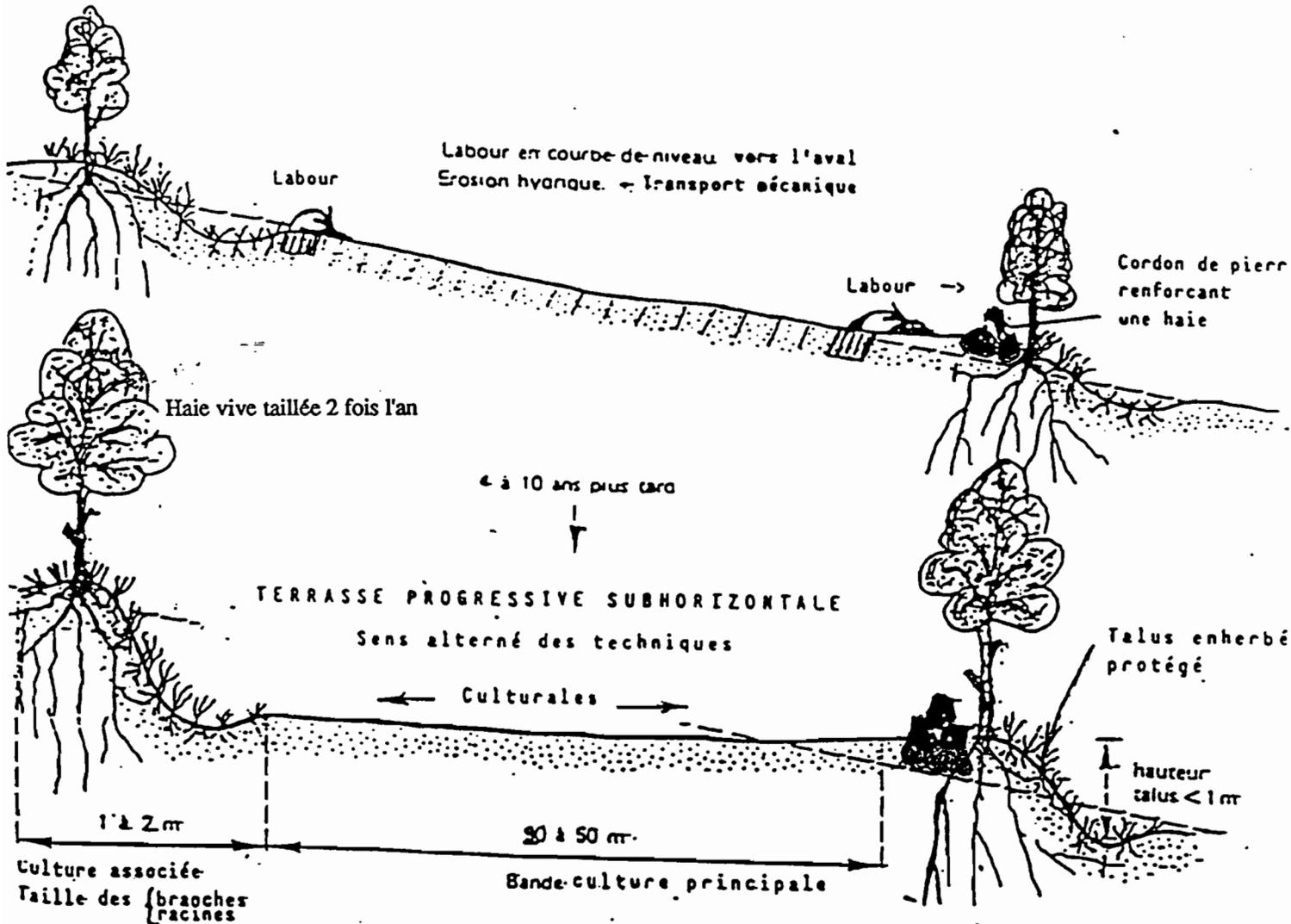
Au cas où les pluies dépassent la capacité d'infiltration du sol, on peut aussi gérer des nappes d'eau ruisselantes en veillant à les disperser tout au long de la surface du versant plutôt que de les concentrer dans les canaux et des exutoires qui causent problème.

FIG. 4.50 - METHODE DES MICROBARRAGES PERMEABLES

MICROBARRAGES PERMEABLES

- = { cordons de pierres, de paille
- bandes d'arrêt enherbées
- haies vives
- lignes d'arbres

aboutissent à des Terrasses Progressives



- Processus

- Réduction de la vitesse du ruissellement par les barrages perméables
 - dépôts de sédiments grossiers + matières organiques
 - augmentation de l'infiltration
- Erosion mécanique par le travail du sol (1 à 10 t/ha/an de terre déplacée)
Reptation lente du sol
Accroissement des interactions biologiques, racines, litière, mésofaune.

- Avantages

- La nature fait le travail
- Efficacité maintenue lors des fortes averses
- Mise en place facile, sans spécialiste topographe
- Maîtrise de l'érosion éolienne
- Bon marché, facile à entretenir, pas de place perdue
- Les risques d'érosion diminuent avec le temps
- Formation de terrasses horizontales
- Diversification de la production : bois, fourrage, fruits
- Le ruissellement : n'engorge pas l'amont irrigue l'aval

TABLEAU 4.52 - INFLUENCE DES BANDES D'ARRÊT ET DU TRAVAIL DU SOL SUIVANT LES COURBES DE NIVEAU EN ZONE TROPICALE HUMIDE ET SECHE (expérimentations en parcelles d'érosion).

Bandes d'arrêt	Largeur	0 m	2 m	4 m	Rapport efficacité	
Adiopodoumé (1965)						
Pluie : 2 300 mm	K R %	16,5	10,3	6,0	1-0,6-0,3	
Manioc	Et/ha/an	18,9	5,7	1,8	1-0,3-0,1	
Pente 7 %						
Bouaké (1965-66)						
Pluie : 1 180 mm	K R %	12,6	5,1	3,8	1-0,4-0,3	
Arachide/maïs	Et/ha/an	7,6	0,9	0,6	1-0,1-0,08	
Pente 4 %						
Traitements	témoin culture traditionnelle Haoussa	bandes d'arrêt 50 cm dh = 40 cm °labour + billonnage ° binages fréquents	murets pierres dh = 80 cm °labour + billonnage ° binages fréquents	bourrelets armés dh = 80 cm °labour + billonnage ° binages fréquents		
Allokoto (1966-71)						
Pluie : 437 mm	R %	17,6	5,2	3,8	0,9	1-0,3-0,2-0,5
Arachide, mil sorgho, coton	Et/ha/an	9,5	1,1	0,5	0,3	1-0,1-0,05-0,03
Pente 4 %						

On peut disperser leur énergie en maintenant leur vitesse inférieure à 25 cm/sec., vitesse qui correspond à l'énergie nécessaire pour permettre l'arrachement des particules du sol par l'énergie propre au ruissellement (Hjulström, 1935). (fig. 4.28).

Cette dispersion tout au long du versant se fait d'une part par les techniques culturales entretenant la rugosité de l'état de la surface du sol (état motteux, nombreuses tiges d'herbe, influence des adventices et du paillage, etc...) et d'autre part, par des structures que j'appellerais des **micro-barrages perméables** qui ralentissent temporairement l'écoulement, permettent une certaine sédimentation, un étalement de la crue, une réduction des débits de pointe et une amélioration de l'infiltration.

1° Rappelons à titre d'exemple l'influence des **bandes d'arrêt** au tableau 4.52 qui réduit le ruissellement à 30 ou 60 % du témoin et l'érosion à 30 et jusqu'à 10 % du témoin.

2° Les haies vives, constituées de deux à trois lignes d'herbes ou d'arbustes semés en quinconce, fonctionnent également comme des micro-barrages perméables très efficaces.

König, dans la station expérimentale du Pasi à Ruhande près de Butare au Rwanda, a montré que sur une pente de 27 % où l'érosion sur sol nu peut atteindre 550 t/ha/an, les arbres isolés ont peu d'efficacité. Par contre, les haies vives de Calliandra ou de Leucaena implantées tous les 10 m réduisent l'érosion à moins de 1 à 2 %. Les haies de Setaria, quant à elles, sont encore deux fois plus efficaces pour réduire l'érosion (0,5 %). (tableau 4.53)

3° Les talus enherbés complexes.

Les micro-barrages (bandes enherbées, haies vives, etc...) aboutissent en quelques années à la formation de terrasses progressives entrecoupées de talus à pente raide protégés par un tapis herbacé.

A la figure 4.54 est représentée l'évolution d'un talus enherbé sur une pente de 10 à 60 % qui, en 5 à 10 ans, atteint 1 à 1,5 m de haut, taille maximale au-delà de laquelle s'accroissent vite les risques de destruction (terriers creusés par les animaux, ravines, glissements de terrain). (Roose, 1990).

Comme l'efficacité de telles mesures diminue si le talus n'est pas continu sur toute la colline, il est recommandé de piqueter avec la communauté rurale, et de planter la première ligne de graminées représentant la courbe de niveau de base sur l'ensemble du versant ou de la colline, quitte à ce que chacun complète l'aménagement au cours des cinq années suivantes, chacun à son rythme sur son terrain. Si on impose à la communauté rurale tout l'aménagement de l'ensemble de la colline, on risque de déresponsabiliser les paysans qui négligent alors leur entretien. (Ngarambe, 1991).

FIG. 4.28 - DIAGRAMME DE HJULSTRÖM

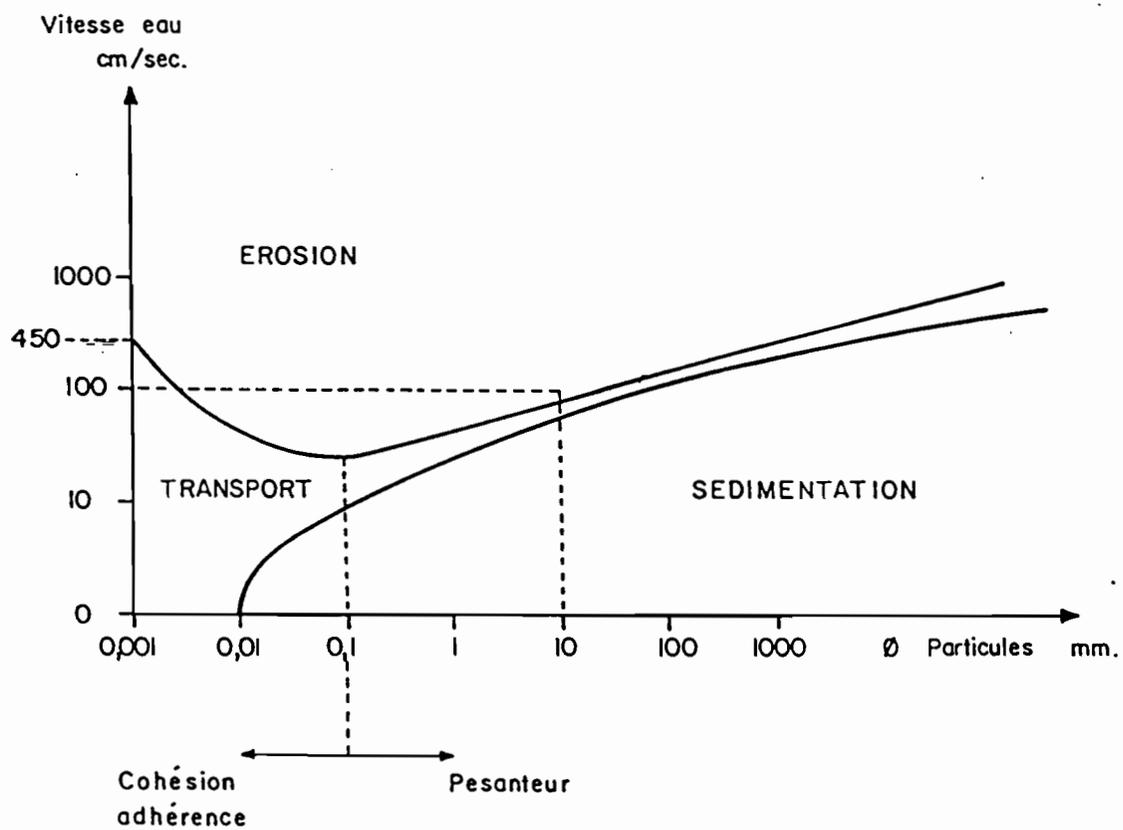
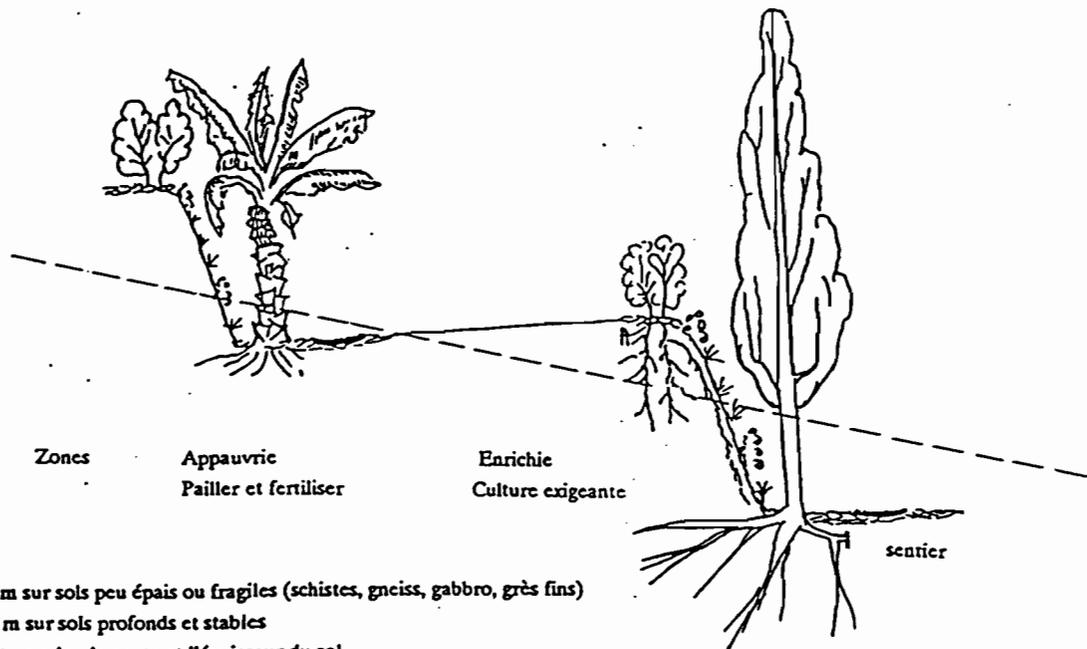
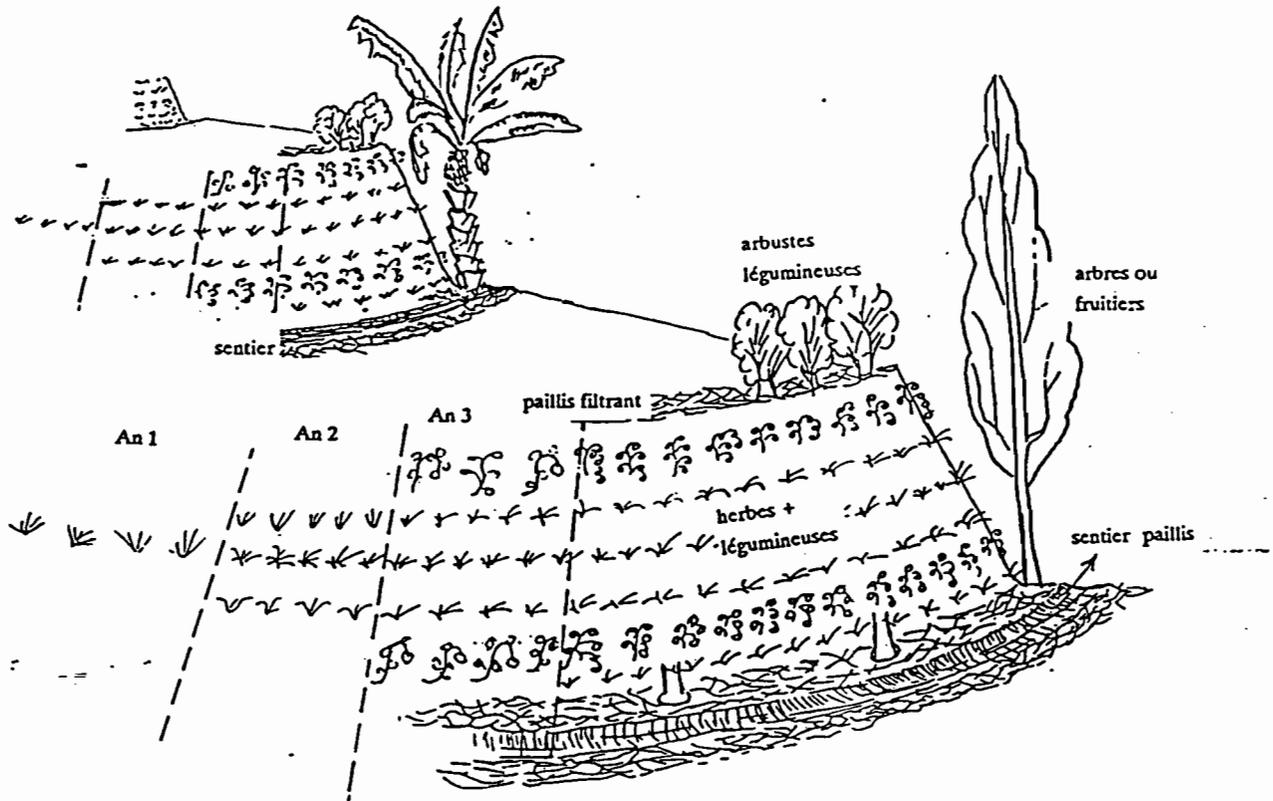


TABLEAU 4.53 - EFFET SUR L'EROSION DES HAIES VIVES EN GRAMINEES (*Setaria*) OU EN ARBUSTES (*Leucaena* ou *Calliandra*) SUR L'EROSION (sur la colline de Ruhande près de Butare au Rwanda). D'après König, 1991.

	E t/ha/an
Témoin international - jachère nue travaillée	557
Témoin régional - culture traditionnelle de manioc	303
idem + arbres <i>Grevillea robusta</i> + cultures associées	110
- culture en allée (<i>Calliandra</i> tous les 5 m) + manioc	16,1
idem + cultures associées	2,8
- haie de <i>Calliandra</i> tous les 10 mètres plantée	12,3
- haie de <i>Calliandra</i> tous les 10 mètres semée	7,6
- haie de <i>Leucaena</i> tous les 10 m plantée	7,4
idem + billons tous les 5 mètres	3,9
- haie de <i>Setaria</i> bouturée	3,2

- ° haies = trois lignes en quinconce sur terrasse d'un mètre de large horizontale, tous les 10 mètres.
- ° culture en allée = deux lignes d'arbustes tous les cinq mètres.
- ° pour que les haies soient efficaces, il faut créer une couche filtre au ras du sol à l'aide de paille de brousse, d'adventices ou des produits de l'émondage de la haie.
- ° Noter :
 - la faible influence des arbres isolés,
 - l'influence raisonnable de la culture en allée,
 - l'influence plus forte des haies d'herbacées que des haies arbustives, qu'on peut compléter en ajoutant des éléments de billons couverts tous les cinq mètres.

Fig. 4.54 Le modèle évolutif de structure antiérosive.



- Hauteur de talus limitée { à 1 m sur sols peu épais ou fragiles (schistes, gneiss, gabbro, grès fins)
à 2 m sur sols profonds et stables
- Distance entre talus : 5 à 20 mètres selon la pente et l'épaisseur du sol
- Talus incliné de \approx 0,4 m par mètre de hauteur, totalement planté en herbes fourragères 20 x 20 cm, enrichi en légumineuses rampantes dans les vides
- Exploitation de 2 à 4 coupes par an
- En amont : { . haie vive de légumineuses : Calliandra, Leucaena, etc...
. taille à 30 cm du sol 2 à 3 fois/an (biomasse 3 à 5 t/ha/an)
. pose au ras du sol d'une couche de paillis filtrante
- En aval, à 1 mètre de la 1ère ligne d'herbe fixatrice, planter dans 1 trou > 70 cm des arbres tous les 4 m (Grevillea, Cedrella, Maesopsis, Casuarina, Bananiers, Avocats, Pêchers, Pruniers)
- Le sentier doit passer au pied du talus impérativement
- La biomasse produite peut servir : { . à l'affouragement du bétail
. au paillage léger du lit de semence en début de chaque saison = période la + dangereuse

4° Les alignements de pierres, de piquets, de touffes d'herbe ou de paille (stone ou grass lines).

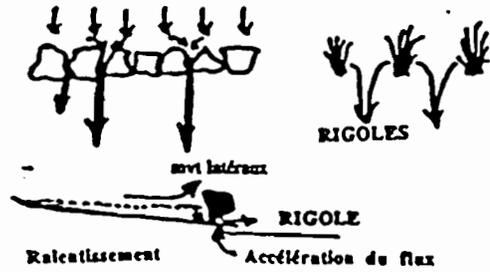
Il s'agit d'obstacles perméables aux nappes d'eau ruisselantes établis en courbes de niveau sur une seule rangée. Ces alignements sont facilement observables en zone semi aride soudano sahélienne, au Mali, au Burkina et au Niger. Ces alignements de pierres ralentissent le ruissellement qui s'étale en nappe de quelques centimètres d'épaisseur. A cause du ralentissement, il provoque la sédimentation des sables et par dessus, des particules plus fines qui colmatent plus ou moins la surface. Ces obstacles filtrent l'eau et retiennent les pailles, les feces des animaux déposés durant la saison sèche sur les parcours, les résidus organiques divers et flottants. Il se dépose donc une fumure localisée dans la zone de sédimentation et dans la zone d'alimentation hydrique. En saison sèche, ces alignements, s'ils sont bien orientés, provoquent le piégeage du sable qui circule par érosion éolienne. Ces alignements créent une hétérogénéité du potentiel de production en concentrant l'eau et les nutriments sur deux à six mètres en amont de l'obstacle et en le redistribuant vers l'aval au cas où il y aurait un excès d'eau.

Dangers - Lorsque la nappe de ruissellement s'épaissit devant les obstacles, elle finit par trouver une issue. A cet endroit, le ruissellement s'accélère par effet Venturi, creuse à l'aval une rigole, creuse sous les cailloux et les enterre.

- En s'étalant, la nappe crée un mouvement latéral qui peut aboutir à une concentration locale du ruissellement avec formation d'un chemin d'eau plus agressif, capable de creuser des rigoles et de déplacer des gravillons et des cailloux.
- Ces alignements sont fragiles : d'un coup de sabot, le bétail qui divague peut déplacer une pierre et former une brèche où l'eau s'engouffre. Les rigoles évoluent alors en ravines.
- La durée de ces alignements est limitée. Les piquets et les pailles pourrissent et sont attaqués par les termites. Les touffes d'herbes s'étouffent au centre, s'étalent et laissent des brèches néfastes. Les cailloux sont bousculés par le bétail ou enfouis sous le sable. Mais les matières organiques accumulées devant ces obstacles ont attiré les termites qui améliorent souvent la macroporosité et la capacité d'infiltration à ce niveau. Il se développe alors quantité d'herbes, d'arbustes et quelquefois d'arbres. Pour lutter contre les mouvements latéraux qui entraînent l'érosion du sol, on peut opter pour un cloisonnement latéral. Il s'agit de construire des petits bourrelets perpendiculairement à l'obstacle ou de cloisonner latéralement le champ pour lui donner une structure en nid d'abeilles souvent utilisée par les Mossi du nord-ouest du Burkina Faso pour restaurer les sols au bas des collines. On peut aussi attendre une année que se dessinent les écoulement d'eau pour renforcer avec

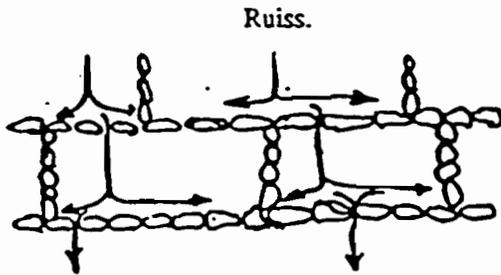
Figure 4.52

Micro-barrages perméables



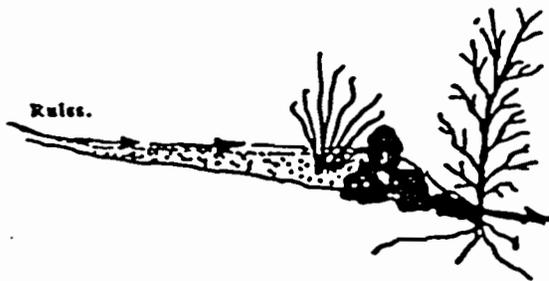
Allonement de pierres (stone line) d'herbes, paille, piquets.

- * une seule rangée d'obstacles perméables
- * ralentit et étale le ruissellement
- * piège le sable éolien + fines du ruissellement
- * fragile : bousculé par bétail + rigole, enterrée par le ruissellement.



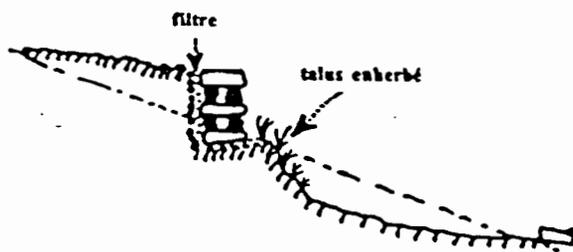
Réseau en nid d'abeilles

- * cloisonnement → réduit les écoulements latéraux
- * utilisé pour restaurer les sols en bas des collines = impluvium.



Cordon de pierres (stone bund)

- * au moins 2-3 niveaux de pierres solidaires
- * consolidé par : herbes > < mvt latéraux haie + arbres > < bétail
- * piège 5 à 15cm de sable + M.O. + limon
- * filtre les matières organiques flottantes
- * étale les écoulements dans le temps/espace.



Muret de pierres + plates

- * entassement soigné de pierres plates
- * mur + filtre drainant
- * aboutit à des terrasses progressives



Diquette semi-filtrante

- * gros cordon de pierres au travers d'une tête de Vallée
- * crête horizontale renforcée
- * ralentit l'écoulement
- * noyau plus fin tassé si on veut retenir une lame d'eau.

de grosses pierres ces zones plus fragiles où les eaux se rassemblent. Enfin, il faut entretenir l'état rugueux du sol par un travail régulier en vue de casser la croûte de battance ou de sédimentation qui bouche la surface du sol. Un sarclo-binage évoluant en buttage cloisonné réduit les risques de concentration des eaux. Enfin, un filtre de paille établi à l'amont des alignements de pierres, des touffes d'herbe et des haies vives, augmente beaucoup leur efficacité.

5° Les cordons de pierres (stone bunds).

Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une l'autre. Ces aménagements sont courants dans la province du Yatenga au Burkina Faso. L'aménagement d'un cordon de pierres exige environ 30 à 60 he/jours, non compté le transport entre la carrière et le champ (1 jour de camion). Ces cordons de pierres ralentissent le ruissellement, l'étalent en nappes de telle sorte qu'il s'infilte en moins d'une heure provoquant la sédimentation successive des sables, des agrégats puis des particules fines humifères, lesquelles vont former une croûte de sédimentation. Seul l'excédent des eaux passe au-dessus du premier niveau de pierres. Le stockage est plus important que pour les lignes de pierres et la nappe s'étend souvent sur cinq à huit mètres devant le barrage perméable. Ce cordon filtre les pailles, les feces et diverses matières organiques flottantes, au point que les paysans considèrent que c'est là l'une de ces fonctions les plus utiles : garder en place la fertilité des sols.

Les cordons piègent peu de sable éolien en saison sèche s'ils ne sont pas orientés perpendiculairement au vent mais bien perpendiculairement à la plus forte pente.

Le premier niveau de pierres est "planté dans le sol" sur quelques centimètres et colmaté avec la terre en amont de manière à accumuler en amont 5 à 15 cm de terre sableuse organique filtrante pour améliorer la capacité de stockage d'eau du sol et former un nouvel horizon humifère.

Le deuxième étage et le troisième rang à l'aval, faits de pierres plus petites ou d'herbe, répartissent les écoulements excédentaires et suppriment le creusement de ravines à l'aval lors des averses importantes en absorbant l'énergie du ruissellement. Le travail du sol dans la bande cultivée et l'érosion provoquent la formation rapide d'un talus qu'il faut stabiliser avec de l'herbe, par exemple de l'Andropogon ou du Pennisetum.

Dangers - Si la crête de la diguette n'est pas strictement horizontale (cas des courbes isohypses lissées), la nappe de ruissellement s'écoule vers les points bas et forme des chemins d'eau qui accélèrent le ruissellement et creusent des rigoles évoluant en ravines qui drainent tout le versant. Si par contre, on cherche à suivre la ligne isohypse stricte, on aboutit à des largeurs de champ cultivés très variables (écart de 10 m à la moindre termitière sur des pentes de 2 %) ce qui gêne la culture mécanisée. Même dans ces cas, on observe la formation de petits chemins d'eau. On peut alors intervenir de diverses manières :

- en renforçant avec de grosses pierres les zones où les eaux se rassemblent et en effectuant un planage progressif ;
- en augmentant la rugosité du sol par un travail grossier aux dents, des sarclages répétés et un buttage cloisonné ;
- en semant des herbes (*Andropogon*) en amont et autour du cordon pour freiner la circulation de la nappe ;
- en cloisonnant le champ sur 5 m en amont du cordon, mais par des billons en terre ou par des cordons de pierres, mais ceux-ci sont gênants pour la mécanisation. (Serpantié et Lamachère, 1991).

La dégradation du cordon par la divagation du bétail peut être réduite par la plantation d'herbes qui couvrent les pierres, et d'une haie vive à l'aval ainsi que d'arbres qui finissent par cloisonner les paysages (= embocagement). Dans les régions où il manque de pierres, on peut semer entre deux billons isohypses (hauteur = 20 cm) une bande d'herbe *Andropogon* de 50 cm ou une haie vive (au moins trois rangs en quinconce) pour obtenir le même effet (Roose, Rodriguez, 1990). Dans les régions montagneuses, les paysans ramassent souvent les pierres à la surface de leurs terres et les entassent à la limite des champs (en particulier talus de bordure des champs). Si des tas de pierres sont disposés le long des courbes de niveau, ils fonctionnent comme des cordons pierreux.

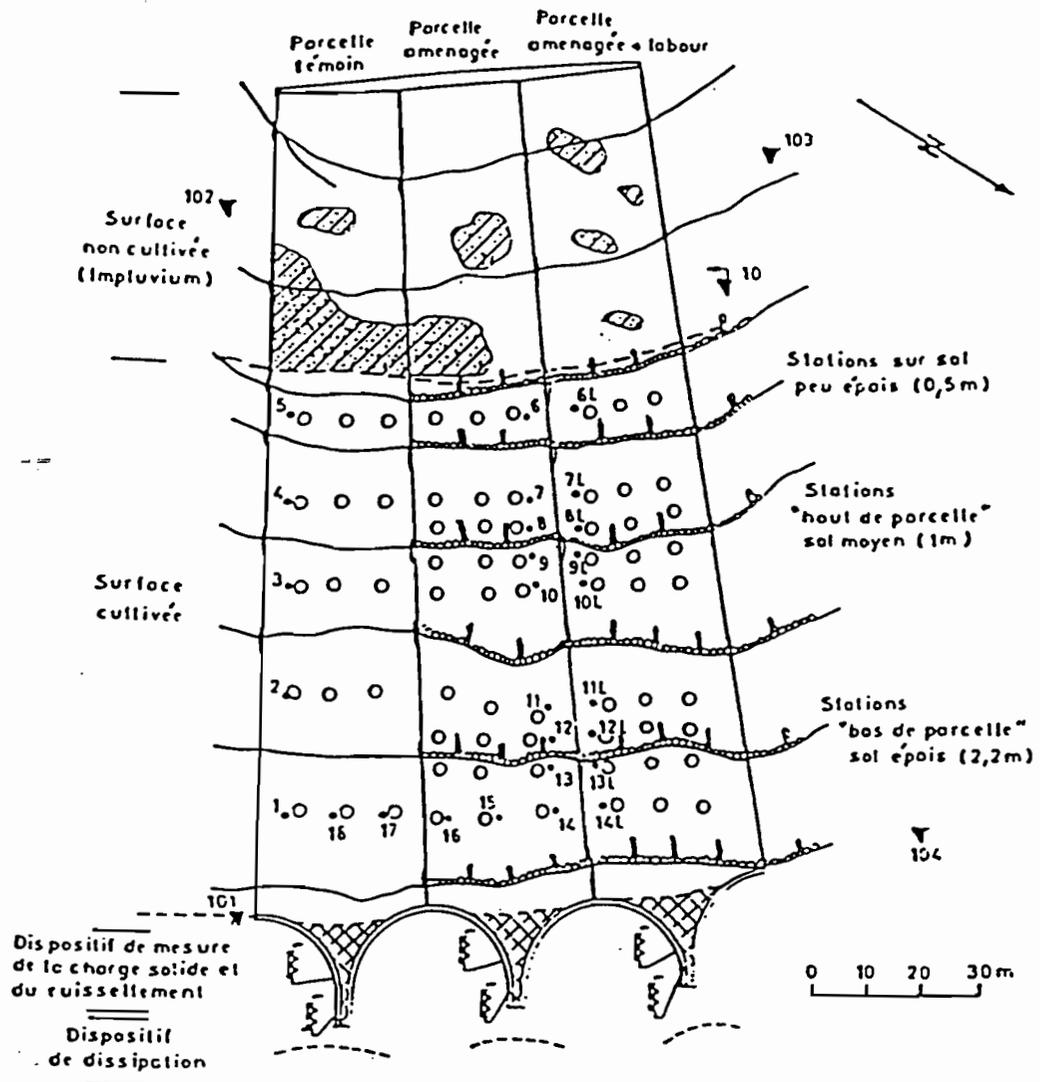
Une équipe de chercheurs de l'ORSTOM (Serpantié, Lamachère, Martinelli et collègues, 1986-1992) ont étudié les effets conjugués d'un aménagement en cordons pierreux combiné au labour et comparé au témoin sous un impluvium dans la région de Bidi, près de Ouahigouya dans le Yatenga au nord-ouest du Burkina Faso (voir à la figure 4.54, le plan d'ensemble de l'essai et au tableau 4.55, les résultats du ruissellement, de l'érosion et des rendements en mil obtenu sur ces trois parcelles.

Ces résultats suscitent quelques commentaires :

1° On constate que le gain d'infiltration, par ralentissement de la nappe ruisselante sur les cordons de pierres, est relativement faible si le sol reste lisse, mais devient beaucoup plus important lorsque la rugosité du terrain est entretenue par le travail du sol, le sarclage et le buttage. Il y a donc une interaction extrêmement positive entre le travail du sol, la rugosité du terrain et l'efficacité des cordons pierreux (voir fig. 4.56 et 4.57).

2° L'effet principal des cordons de pierres étant de retarder les écoulements en les étalant au-devant de ces obstacles, les débits de pointe du ruissellement au bas du versant sont plus faibles, les écoulements plus durables après la pluie, la vitesse des écoulements en nappe plus faible, et donc les transports solides décroissent très sensiblement (moins 50 %).

FIGURE 4.54 - PLAN D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE BIDI (Samniweogo - Burkina Faso) d'après Lamachère et Serpantié, 1991.



- | | | | |
|-----|---|------------------------|--|
| • 3 | Point de suivi du profil hydrique et phénologie | (pente générale 2,5 %) | |
| ○ | Station de récolte | ▨ | Cordons pierreux (0,25 m) |
| ⊖ | Microbuttes sableuses | ~ | Courbe de niveau (0,5 m) |
| — | Tôles (0,2 m et 0,6 m) | 102 | Pluviomètre |
| — | Muret (0,2 m) | 10 | Pluviographe |
| — | Exutoire en béton | ⊥ | Limnigraphe et échelles limnimétriques |

TABLEAU 4.55 - EXPERIMENTATION SUR LES EFFETS DES CORDONS PIERREUX ET DU TRAVAIL DU SOL SUR LE RUISSELLEMENT, L'EROSION ET LES RENDEMENTS EN MIL A LA STATION DE BIDI (SAMNIWEOGO), NORD YATENGA, BURKINA FASO.

Sol ferrugineux tropical, sablo-argileux bien drainant, profond de 25 à 220 cm sur cuirasse. Pente 2,5 %. Parcelles de 3 100 m² recevant jusque fin 1987, le ruissellement d'un impluvium de 1 250 m².

Année	Pluies mm + 2	Traitements	Ruissellement				Erosion t/ha/an	Rendements kg/ha	
			KRA M %	Sol lisse humide	KR Max %			biomasse	grain
					lisse sec	rugueux			
1985 + impluvium	<u>239</u>	1) traditionnel	29	<u>35</u>	34	<u>75</u>	-	1080	137
		2) " + cordon pierreux	24	<u>40</u>	32	<u>57</u>	-	1470	136
1986 + impluvium	530	1) T.	24	34	<u>67</u>	42	(2,80)	2520	233
		2) T + CP.	<u>23</u>	<u>48</u>	<u>49</u>	30	(1,96)	3010 (+19%)	406 (+ 4 %)
		3) T + CP + Labour + CP +						4640 (+54%)	837 (+106 %)
1987 + impluvium	400	1) T	11	<u>62</u>	<u>32</u>	29	1,01	1770	346
		2) T + CP	9	<u>60</u>	<u>16</u>	11	0,32	2330 (+32 %)	443 (+ 28 %)
		3) T + CP + L	3	<u>16</u>	<u>0</u>	10	<u>0,40</u>	3140 (+35 %)	679 (+ 53 %)
1988 + cloisons - impluv.	520	1) T	18	<u>50</u>	23	34	1,60	1890	385
		2) T + CP	10	<u>24</u>	14	16	0,57	2090 (+ 11%)	362 (- 6 %)
		3) T + CP + L	13	<u>35</u>	<u>20</u>	<u>19</u>	<u>1,30</u>	2290 (+ 10%)	438 (+ 21 %)
Effet moyen sur 2-3-4 ans			Infiltration				Erosion		
cordon - témoin			+ 4 %				- 34 %	+ 22 %	+ 22 %/4 ans
cordon + labour - cordon			+ 4,3 %				+ <u>52</u> %	+ 48 %	+ 61 %/3 ans

d'après Serpantié, Lamachère, 1991.

Notes :

- a - 1) T = culture de mil traditionnelle + fumure légère : 7 N + 10 P + 7 K
semis direct à 45 000 pieds puis 2 sarclages - débattage.
 - 2) T + CP = idem 1 + cordons pierreux isohypses à 40 kg/m², soit deux lignes de blocs de cuirasse tous les 20 mètres + cloisons latérales à partir de 19880
 - 3) T + CP + L = idem 2 + labour aux boeufs entre 15 juin et 15 juillet et semis le jour même.
- b - Les cordons pierreux mis en place ont peu d'action sur le ruissellement global et lors des pluies qui surviennent sur un sol rugueux (KRAM) mais bien sur les débits de pointe, le retard et l'étalement des écoulements et les risques d'érosion.
- Le fonctionnement hydrodynamique dépend des interactions entre les cordons et la rugosité du sol. L'impact sur les rendements dépend du volume des pluies et de leur répartition en partie lors de la floraison et du remplissage des grains.
- c - Le travail du sol, combiné ici à la structure antiérosive, permet d'améliorer significativement l'infiltration des 100 premiers millimètres de pluie. Au-delà, les croûtes de battance et sédimentation sont si développées que les gains d'infiltration dus aux cordons de pierres, deviennent négligeables par rapport au témoin.
- d - L'apport dû à l'impluvium est surtout sensible sur les parcelles amonts tant que les sols sont suffisamment absorbants.
- e - Les améliorations des conditions d'alimentation hydrique des plantes posent le problème du renouvellement des éléments nutritifs disponibles des sols : l'accroissement de production de biomasse non restituée accélère l'appauvrissement des terres.
- f - L'effet positif du labour sur les gains d'infiltration et des rendements diminue d'une année à la suivante tandis que les pertes par érosion augmentent. Il semble que le labour fragilise le sol et le rend plus érodible en accélérant la minéralisation de l'humus du sol.

- en semant des herbes (Andropogon) en amont et autour du cordon pour freiner la circulation de la nappe ;
- en cloisonnant le champ sur 5 m en amont du cordon, mais par des billons en terre ou par des cordons de pierres, mais ceux-ci sont gênants pour la mécanisation. (Serpantié et Lamachère, 1991).

La dégradation du cordon par la divagation du bétail peut être réduite par la plantation d'herbes qui couvrent les pierres, et d'une haie vive à l'aval ainsi que d'arbres qui finissent par cloisonner les paysages (= embocagement). Dans les régions où il manque de pierres, on peut semer entre deux billons isohypses (hauteur = 20 cm) une bande d'herbe Andropogon de 50 cm ou une haie vive (au moins trois rangs en quinconce) pour obtenir le même effet (Roose, Rodriguez, 1990). Dans les régions montagneuses, les paysans ramassent souvent les pierres à la surface de leurs terres et les entassent à la limite des champs (en particulier talus de bordure des champs). Si des tas de pierres sont disposés le long des courbes de niveau, ils fonctionnent comme des cordons pierreux.

Une équipe de chercheurs de l'ORSTOM (Serpantié, Lamachère, Martinelli et collègues, 1986-1992) ont étudié les effets conjugués d'un aménagement en cordons pierreux combiné au labour et comparé au témoin sous un impluvium dans la région de Bidi, près de Ouahigouya dans le Yatenga au nord-ouest du Burkina Faso (voir à la figure 4.54, le plan d'ensemble de l'essai et au tableau 4.55, les résultats du ruissellement, de l'érosion et des rendements en mil obtenu sur ces trois parcelles.

Ces résultats suscitent quelques commentaires :

1° On constate que le gain d'infiltration, par ralentissement de la nappe ruisselante sur les cordons de pierres, est relativement faible si le sol reste lisse, mais devient beaucoup plus important lorsque la rugosité du terrain est entretenue par le travail du sol, le sarclage et le buttage. Il y a donc une interaction extrêmement positive entre le travail du sol, la rugosité du terrain et l'efficacité des cordons pierreux (voir fig. 4.56 et 4.57).

2° L'effet principal des cordons de pierres étant de retarder les écoulements en les étalant au-devant de ces obstacles, les débits de pointe du ruissellement au bas du versant sont plus faibles, les écoulements plus durables après la pluie, la vitesse des écoulements en nappe plus faible, et donc les transports solides décroissent très sensiblement (moins 50 %).

3° La biomasse produite est généralement plus forte avec cordons de pierres sauf lorsqu'il y a des engorgements qui gênent la croissance du mil. Quant à la production de grains de mil, elle a été accrue de 15 à 50 % sur le champ aménagé en cordons et de 50 à 80 % si le

FIGURE 4.56 - COMPARAISON DES RUISSELLEMENTS : PARCELLE TEMOIN / PARCELLE AMENAGEE. PLUIES STANDARDS

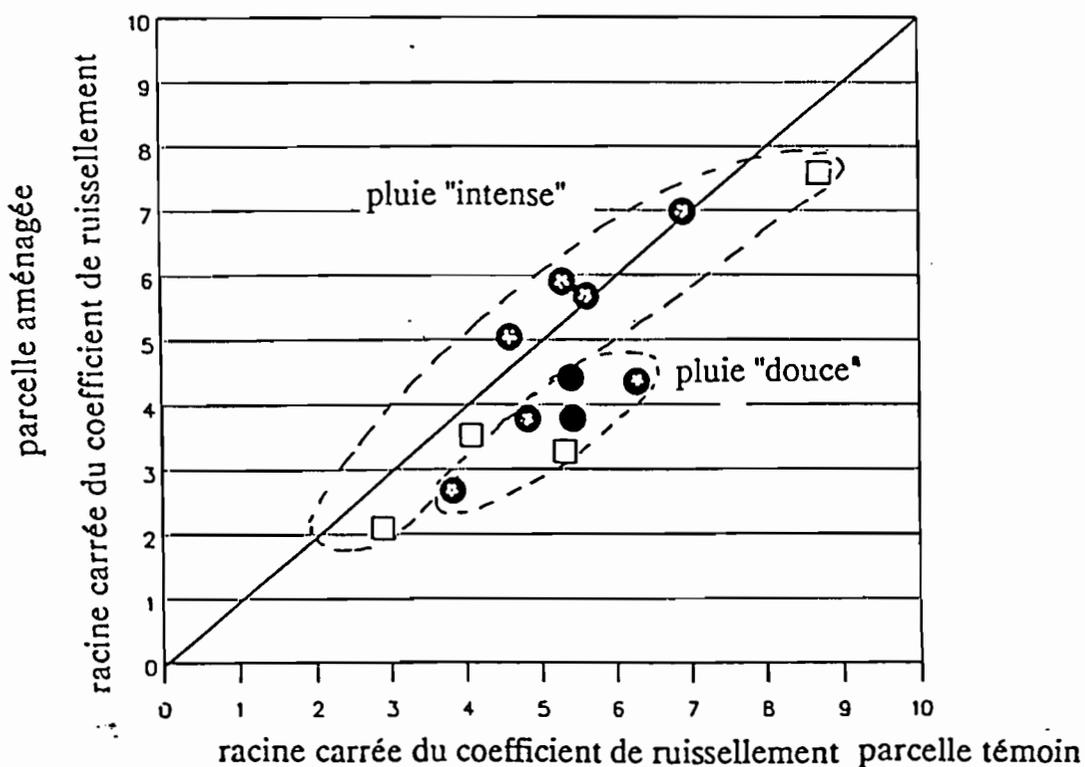
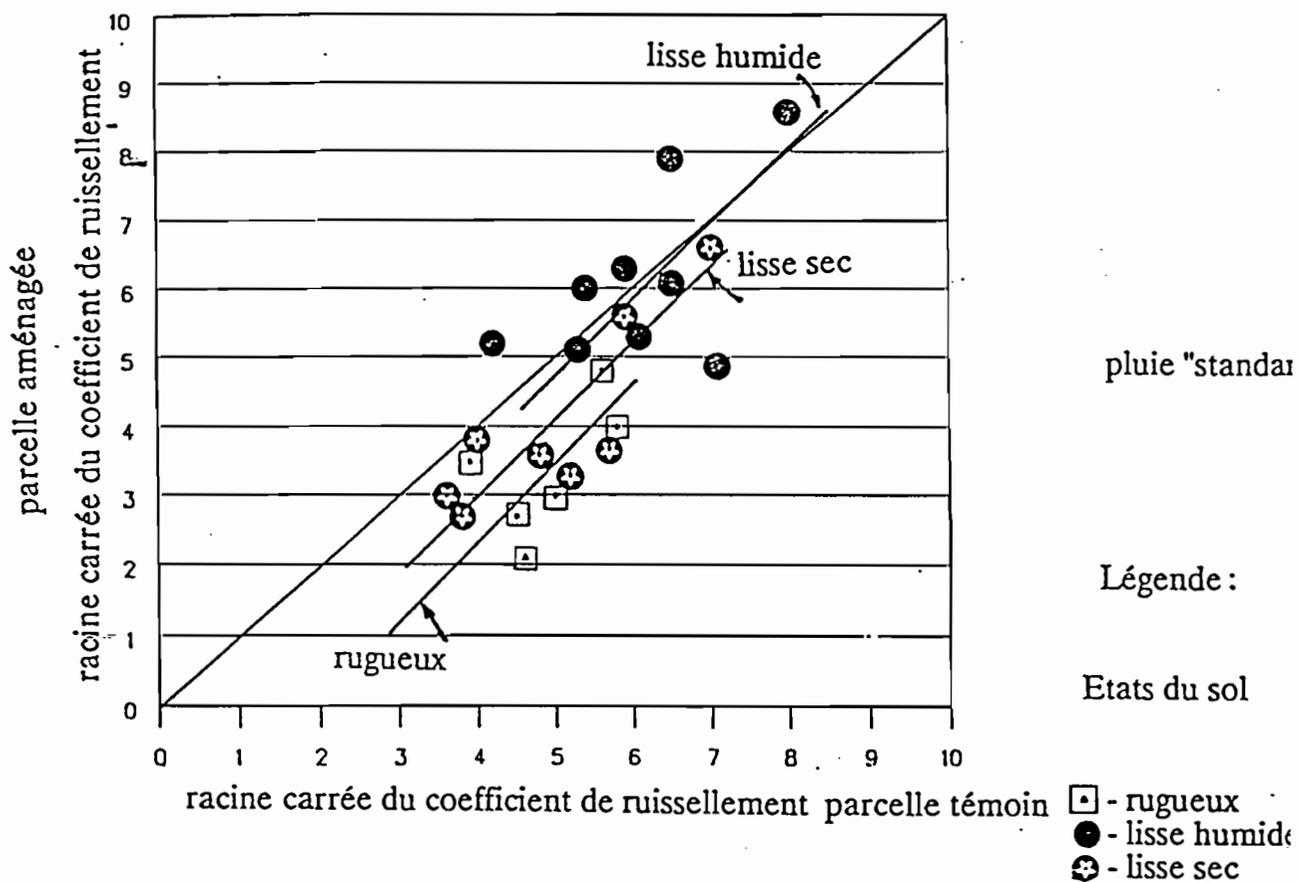


FIGURE 4.57 COMPARAISON DES RUISSELLEMENTS : PARCELLES TEMOIN / PARCELLES AMENAGEES. AUTRES PLUIES (d'après Lamachère, Serpantié, Guillet, 1990).

3° La biomasse produite est généralement plus forte avec cordons de pierres sauf lorsqu'il y a des engorgements qui gênent la croissance du mil. Quant à la production de grains de mil, elle a été accrue de 15 à 50 % sur le champ aménagé en cordons et de 50 à 80 % si le travail du sol est combiné aux cordons de pierres. Cependant, lors des années les plus sèches (par exemple 1985), la production est aussi faible qu'en dehors de l'aménagement. L'aménagement en cordons ne réduit donc pas les risques de famine en année particulièrement sèche. La production de mil peut aussi souffrir d'engorgement lorsque les pluies mensuelles dépassent 200 mm.

4° L'action d'un cordon de pierres se fait sentir surtout à l'amont mais aussi à l'aval.

- A l'amont, par l'étalement du ruissellement en nappe, dépôt de sable et de matières organiques sur 5 à 8m sur des pentes de 2 %, le cordon se colmate sur 5 à 15 cm, augmentant localement l'horizon à humifère, zone d'augmentation d'eau disponible mais aussi risque d'engorgement.
- A l'aval, des filets d'eau se faufilent entre les sommets des pierres et peuvent ou bien s'étaler en nappe et irriguer à nouveau toute la surface, ou bien se concentrer en quelques rigoles creusant des chemins d'eau (nappe ravinante) qui vont drainer, creuser et assécher la partie aval avec risque de destruction locale du système de cordon par érosion régressive. L'action positive étant localisée aux abords des cordons, il vaut mieux poser des petits cordons tous les 20 m (25 % de sol touché par l'aménagement), que de gros cordons tous les 50 m (seulement 10 % de surface enrichie par l'aménagement), d'autant plus que les grosses pierres ont tendance à concentrer les écoulements en gros filets et donc augmentent les risques de fortes concentrations d'eau.

5° Le ralentissement de la nappe de ruissellement entraîne l'accumulation des eaux en flaques le long du cordon. Les eaux vont alors migrer latéralement pour rejoindre une issue, un point bas dans les cailloux et peuvent provoquer une érosion latérale et une concentration dangereuse des eaux. Les solutions aux mouvements obliques de ces eaux sont nombreuses : billonnage cloisonné ou débutage formant une grande rugosité à la surface de la parcelle, cloisonnement perpendiculaire au cordon ou implantation d'herbes d'Andropogon stabilisant le pourtour du cordon.

6° Murettes de pierres sèches (stone walls) (fig. 4.52).

Il s'agit d'un mur construit soigneusement en empilant des pierres plates calées par de petits fragments de roche. On en trouve fréquemment dans les massifs montagneux gréseux, comme près de Bamako au Mali. Pour construire un muret de pierres sèches, il faut d'abord creuser une tranchée en courbe de niveau jusqu'à un horizon cohérent,

- assurer, au fond et sur la paroi de la tranchée, un filtre drainant constitué d'une couche de sable et de gravier,
- sur pente moyenne à forte, on aboutit rapidement à des terrasses progressives par le rejet des terres de la tranchée vers l'amont, par érosion hydrique et surtout par érosion mécanique sèche lors des travaux culturaux.

Danger - la pression de la couverture pédologique et d'une nappe hydrique directement sur le mur forme un ventre : le muret va finir par s'écrouler si on n'a pas prévu de couche filtrante. Il faut prévoir un bon drainage à l'amont du mur et une couche de gravier sous le mur.

Au cours du temps, on va observer la dénudation du pied du mur par érosion hydrique ou par les travaux culturaux dans le champ à l'aval du mur.

Il faut enherber le talus qui se développe au pied du mur ou y planter des arbres fruitiers qui empêcheront la terre de ramper vers le bas de la colline.

7° Les diguettes filtrantes perméables et semi perméables.

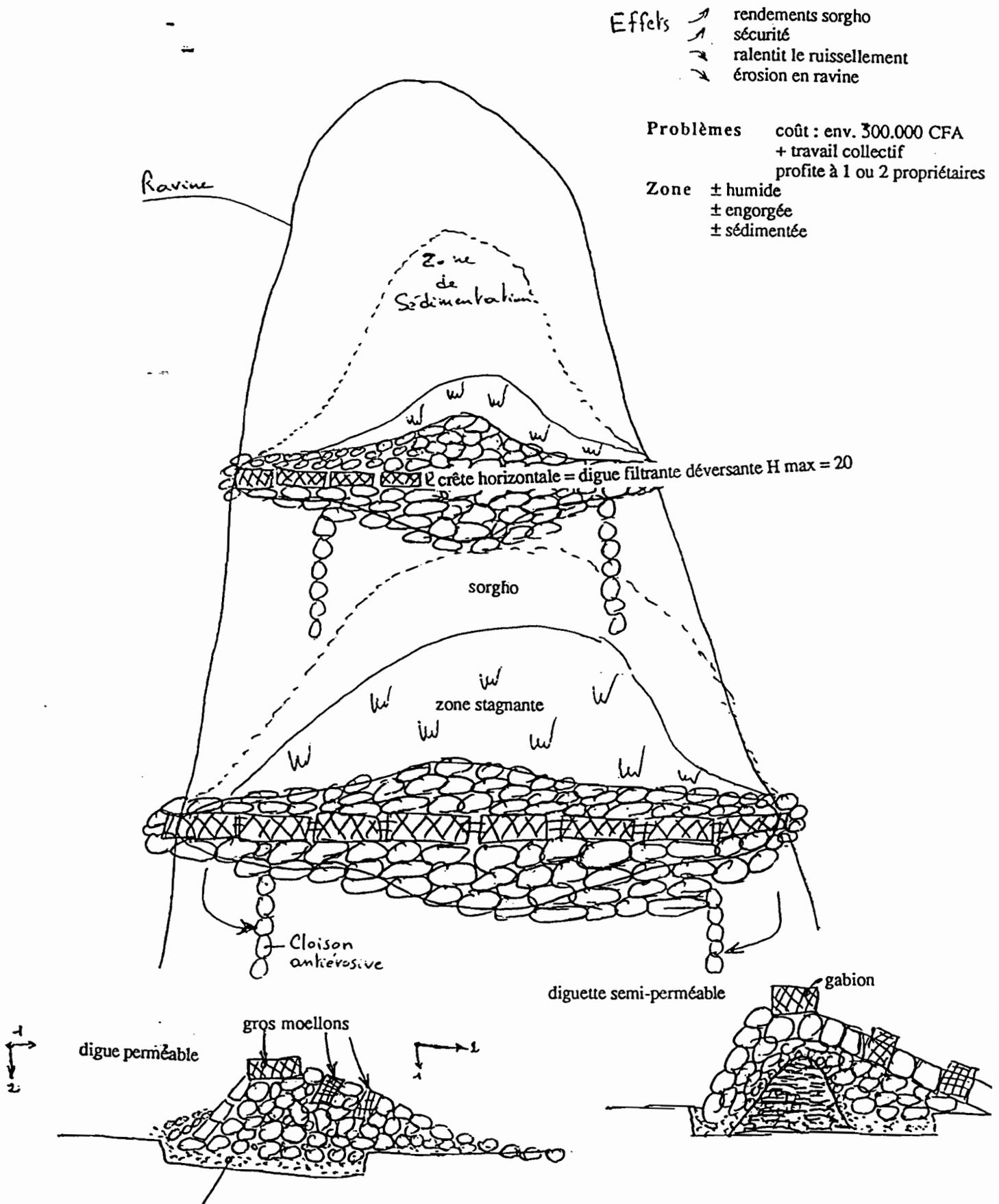
Il s'agit d'un entassement de grosses pierres sur une ligne, la crête étant en courbe de niveau, barrant une tête de vallée en vue de ralentir les écoulements, de favoriser l'infiltration et l'alimentation de la nappe phréatique. La construction de ces énormes cordons de pierres peut prendre 300 à 600 hommes/jour pour construire une diguette de 100 à 300 m de long et de 1 à 2 m de haut. La largeur de la diguette dépend de sa hauteur et de la profondeur du ravinement en chaque endroit. Il faut que la crête de la diguette soit absolument isohypse et que cette diguette soit posée dans une fosse de fondation (H = 20 à 40 cm) recouverte elle aussi d'un lit filtrant. Le ruissellement au fond de la vallée, est ralenti par cet obstacle, mais il passe vite entre les grosses pierres à moins que l'on ait prévu un noyau filtrant de graviers plus fins. Celui-ci peut retenir les eaux pendant quelques jours.

Si on veut garder une nappe d'eau à l'amont (pour faire un barrage semi filtrant), par exemple pour produire du riz, il faut aménager un noyau argileux derrière le filtre de gravier.

La sédimentation à l'amont de la digue pierreuse est fine et lente (un mm par an) en paysage ondulé peu dégradé, mais elle peut être rapide (10 cm par an) dans des zones collinaires ravinées. (Par exemple, dans la zone au nord de Ouagadougou). (Voir Rochette, 1989).

Les dangers - Si la filtration est trop rapide à travers la diguette de grosses pierres, on peut observer l'érosion creuser des renards sous la digue et en aval. Si celle-ci est trop forte, il se creuse une ravine qui, par érosion régressive, va finir par former une brèche dans la digue. Pour ralentir le ruissellement, il faut donc construire un filtre de gravier et de sable que l'on coule dans la cuvette de fondation sous la diguette ainsi qu'entre les grosses pierres du coeur de la diguette (voir fig. 4.53).

FIG. 4.53 - DIGUETTE FILTRANTE OU SEMI - FILTRANTE



Effets ↗ rendements sorgho
 ↗ sécurité
 ↘ ralentit le ruissellement
 ↘ érosion en ravine

Problèmes coût : env. 300.000 CFA
 + travail collectif
 profite à 1 ou 2 propriétaires

Zone ± humide
 ± engorgée
 ± sédimentée

Ravine

Zone de Sedimentation

crête horizontale = digue filtrante déversante H max = 20

sorgho

zone stagnante

Cloison anti-érosive

diguette semi-perméable

gabion

digue perméable

gros moellons

tapis filtrant (cailloux, gravier, sable) pour empêcher la formation de renards sous la diguette par aspiration des eaux circulant entre les moellons.

Si la nappe d'eau dépasse la diguette de plus de 20 cm, celle-ci risque d'être emportée par la vitesse du courant. Pour empêcher le courant d'emporter la digue, on fait mettre sur la crête de la diguette, des grosses pierres ou mieux, un petit gabion, de même que sur la face arrière de la diguette (pente 2/1).

Normalement, les eaux s'écoulent rapidement après la fin de la pluie, mais les terrains directement en amont sont détrempés. Il arrive alors que le sorgho qui occupe traditionnellement les fonds des vallées plates pourrisse, souffre d'engorgement alors qu'il n'y a pas d'eau stagnante suffisamment longtemps pour faire pousser du riz, céréale très recherchée pour les fêtes. Seuls les jardins de contre-saison et les arbres fruitiers situés autour de la vallée profitent alors d'une amélioration d'alimentation en eau de la nappe grâce à la diguette filtrante. Il faut donc bien préciser les objectifs. Les diguettes filtrantes améliorent l'alimentation de la nappe mais retiennent peu d'eau, pas assez pour produire du riz dans quatre années sur cinq dans la région de Ouahigouya (Serpantié). Si on veut créer une rizière, il vaut mieux choisir une digue en terre, imperméable, retenant une lame d'eau suffisamment importante pour la culture du riz flottant.

Il faut noter aussi les risques de problème foncier. en effet, la construction d'une digue filtrante exige un travail communautaire important (15 personnes pendant 30 jours) et le déplacement d'un volume impressionnant de cailloux (de 100 à 500 m³ ; coût moyen, de 200 à 500 000 F CFA). Or cette structure qui a demandé tant d'efforts à la communauté ne permettra d'améliorer que 0,5 à 1 hectare appartenant probablement à une seule famille. Pour éviter les palabres, il faut prévoir à l'avance la redistribution des terres aménagées aux participants de l'aménagement. Pour le même effort et le même volume de pierres, on pourrait aménager 10 à 20 Ha de versants appartenant à une vingtaine de familles qui peuvent réaliser seules l'aménagement de leur terre. Il reste à savoir si cet aménagement en cordon de pierres des versants apportera la même sécurité de production que l'aménagement des bas-fonds. En effet, si certains bas-fonds sont complètement inondés en saison des pluies, dans les années particulièrement sèches, ces bas-fonds sont les seuls endroits où les villageois peuvent trouver une certaine production.

Il est donc essentiel pour la sécurité d'un ménage de mettre en valeur à la fois des terres de bas-fonds qui produiront les années sèches, et des terres de versants qui produiront mieux les années humides.

En tout cas, il faut retenir que cette méthode (comme les autres d'ailleurs) n'est pas la solution universelle. Elle est très valable dans certains bas-fonds ravinés mais beaucoup moins dans des fonds plats où il se passe très peu de sédimentation.

En conclusion, les micro-barrages semi perméables sont très nombreux et très variés. Ils ont l'avantage d'être facilement maîtrisés par les villageois eux-mêmes et de modifier les conditions topographiques, l'inclinaison de la pente. Cependant, ils laissent passer une partie du ruissellement ainsi que des nutriments et des colloïdes qui font la richesse de ces terres. Ces eaux peuvent être récupérées en aval dans des aménagements d'irrigation.

4.9 Conclusions sur les méthodes de lutte antiérosive

Avant d'adopter l'une ou l'autre des méthodes de lutte antiérosive, il est souhaitable de revenir aux causes de l'érosion et aux facteurs qui en modifient l'expression dans les conditions écologiques où ce travail a été effectué, c'est à dire, les collines des vieilles surfaces de l'Afrique de l'Ouest.

L'analyse des résultats disponibles dans le cadre de l'équation de prévision de l'érosion, soit environ 550 parcelles/année, permet de les passer en revue et de les quantifier (Roose, 1975) :

- a) **L'indice d'agressivité climatique (R : indice U.S.A.)** est très élevé : il croît de 200 unités au nord du Burkina Faso à plus de 1400 en Basse Côte d'Ivoire (voir la carte). De plus, sa répartition au cours de l'année est très hétérogène : 75 % de la valeur de R annuel sont souvent concentrés en 2 ou 3 mois, au début de la saison culturale lorsque les sols cultivés sont peu couverts.

- variabilité de R = 100 à 2000 -

- b) **La résistance des sols à l'érosion** (cas des sols ferrallitiques ; K = 0,01 à 0,18) et des sols ferrugineux tropicaux cultivés (K : 0,20 à 0,30) est bien plus satisfaisante que celle de bon nombre de sols lessivés des régions tempérées (K varie de 0,20 à 0,60).

- variabilité de K = 0,01 à 0,30 -

Cependant il est difficile de réduire l'érodibilité d'un sol une fois qu'il est dégradé, qu'il a perdu sa matière organique, son argile, sa structure et sa perméabilité : K augmente de 0,10 - 0,20 à 0,20 - 0,35 avec la dégradation du sol sous culture.

- c) **Le facteur topographique** regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente. L'influence de la longueur de la pente n'est ni constante, ni très élevée : pour des raisons pratiques, une équipe de chercheurs américains a estimé que l'érosion croît comme la racine carrée de la longueur de pente. Par contre, l'influence de l'inclinaison de la pente est déterminante. Les transports solides croissent de façon exponentielle ($E = \pm 1,4 \text{ à } 2$) avec le pourcentage de pente (Zingg, 1940 ; Hudson, 1973 ; Roose, 1975) ou encore selon une équation du second degré très voisine (Wischmeier et Smith, 1960). Sur les pentes les plus courantes (0,1 à 15 %) d'une longueur de 60 m, la variabilité de SL se situe dans une gamme de 0,1 à 5.

SL varie de 0,1 à 5 (et jusqu'à 20 en montagne)

- d) **La couverture du sol (facteur C)** assurée par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui l'emporte sur celle de tous les autres facteurs qui conditionnent l'érosion. En effet, quels que soient l'agressivité du climat, la pente, le type de sol, les phénomènes d'érosion seront médiocres si le sol est couvert à plus de 90 %. Noter cependant que les techniques culturales vont intervenir puissamment durant la phase de croissance des végétaux.

- variabilité de C = 1 à 0,001

En conclusion, dans les régions tropicales humides qui nous intéressent ici, les facteurs les plus importants sur lesquels on peut intervenir pour limiter l'érosion et le ruissellement, sont avant tout le développement du couvert végétal et l'inclinaison de la pente.

Pour atteindre ce but, quatre approches de type biologique semblent possible :

- 1°) Intensification de l'agriculture sur les terres les meilleures et les moins pentues. Une attention particulière est due à la date, à la densité du semis, à la fertilisation et à l'usage des pailles et résidus des cultures à la surface du sol, à la préparation du lit de semence et à la gestion des matières organiques.
- 2°) Protection des zones les plus sensibles par une couverture permanente et protégée des feux sauvages (forêt, savane, pâturage ou verger).

- 3°) Aménagement des ravines et des exutoires en vue d'évacuer les excès d'eau temporaires avec un transport minimal. Aménagement des voies d'accès aux parcelles et de leur drainage.
- 4°) Aménagement définitif du cadre foncier au niveau du bassin versant à l'aide de bandes antiérosives et orientation de tous les travaux culturaux dans le sens approximatif, perpendiculaire à la ligne de la plus grande pente.

Contrairement aux aménagements mécaniques qui coûtent cher, sont peu rentables et difficiles à entretenir, les méthodes biologiques proposées sont bien adaptées au milieu tropical où l'herbe est abondante, où les pentes sont moyennes et où les moyens techniques et financiers sont rares. De même, si on se place au niveau de la stabilisation du régime hydrique du sol et des cours d'eau, de la protection des ouvrages routiers et hydrauliques comme de l'augmentation de la production agricole, nul doute qu'il vaille mieux augmenter l'infiltration sur l'ensemble du terroir agricole par l'extension du couvert végétal plutôt que d'évacuer toutes les eaux excédentaires en surface.

4.10. Limites de l'équation de Wischmeier et Smith

Un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelle expérimentale (plus de 560) ont été réalisées en Afrique de l'Ouest. Elles nous permettent aujourd'hui de critiquer et de mettre en pratique l'équation de prévision de l'érosion proposée par Wischmeier et Smith (1960).

Il convient de rappeler tout d'abord que cette équation vise la prévision de l'érosion en nappe et en rigole, donc de l'érosion commençante dans les zones de plaine à l'exclusion des zones montagneuses où dominant l'énergie de ruissellement et l'érosion linéaire (ravines et rivières) et où les pluies ont des caractéristiques différentes. Elles n'abordent pas le problème de ruissellement ni celui des transports en solution.

En second lieu, cette équation empirique est basée sur l'analyse statistique d'un grand nombre de résultats car elle vise le comportement moyen à long terme (sur 20 ans) ; il importe donc de disposer de nombreuses répétitions dans l'espace et surtout dans le temps (forte variabilité climatique) pour estimer localement la valeur des différents coefficients à utiliser. En l'absence de résultats locaux, on peut cependant s'appuyer sur les tables donnant les valeurs des coefficients aux Etats-Unis ou en Afrique de l'ouest.

Enfin, les données provenant de parcelles ou de bassins versants de surface très limitée, il peut se poser des problèmes d'échelle lorsqu'il s'agit de prévoir des valeurs régionales d'érosion ou encore de transports solides sur de vastes bassins versants concernés par des aménagements hydrauliques et par l'envasement des barrages. De plus, l'équation néglige l'aspect qualitatif des matériaux érodés. Or, la richesse de bon nombre de sols tropicaux se trouve stockée dans les 20 premiers centimètres (surtout sous forêt) et l'érosion en nappe arrache sélectivement des colloïdes organiques et minéraux ainsi que les éléments nutritifs qui assurent la réserve chimique et hydrique du sol (Roose, 1967-73). Enfin cette équation, en cherchant à simplifier les différents paramètres, a négligé les interactions entre les différents facteurs qui sont malheureusement extrêmement nombreuses. Ainsi on observe une grande réaction du sol à l'agressivité des pluies, en fonction des pentes, selon que les sols sont argileux ou sableux et selon l'état de la surface du sol. Nombreux sont les chercheurs qui sont déçus de ces résultats moyens sur une longue période, qui sont difficiles à comparer à des résultats obtenus au simulateur de pluie à une époque bien précise de l'année ou bien à des valeurs journalières de pluies de ruissellement et de perte en terre, à l'échelle de petites parcelles.

Ceci étant admis, il faut reconnaître non seulement l'utilité pratique de cette équation sur le terrain pour rationaliser l'aménagement de l'espace rural, mais aussi un intérêt scientifique certain pour définir l'influence relative de chacun des facteurs en cours. Cette équation répond donc bien à sa vocation qui est de déterminer les techniques antiérosives à mettre en oeuvre dans chaque cas particulier de l'aménagement du territoire. Sur le vieux continent africain l'utilisation de l'équation de Wischmeier semble parfaitement justifiée par une masse de résultats (560) se rapportant aux sols, aux plantes et aux pentes les plus couramment cultivées en Afrique de l'Ouest.

L'indice d'agressivité tient fort bien compte des interactions entre la hauteur, l'intensité et la durée des pluies sur les transports solides ; il pourrait cependant lui être ajouté un indice d'humidité du sol exprimant l'état de ce dernier avant la pluie. Le dépouillement fastidieux de milliers de pluviogrammes a permis de présenter une première esquisse de la répartition spatiale de l'indice d'agressivité annuel moyen et de constater qu'en dehors de la frange côtière et des zones de montagne, les pluies ont des caractéristiques (hauteur, intensité, durée, fréquence) voisines sur les basses régions d'Afrique de l'Ouest. Cependant il faut se poser la question de savoir s'il convient de fonder la lutte antiérosive sur des valeurs moyennes de l'agressivité des pluies ou bien sur des risques décennaux ou centennaux découlant des averses exceptionnelles. Cette approche fréquentielle reste à faire.

La couverture du sol assurée par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui l'emporte sur celle de tous les autres facteurs conditionnant l'érosion. L'architecture des plantes ainsi que les techniques culturales ne jouent qu'un rôle secondaire une fois que le sol est couvert à 90 %. Cependant les techniques culturales peuvent intervenir durant la phase de croissance des végétaux. L'indice C permet par ailleurs de sélectionner les techniques et les plantes les mieux adaptées aux conditions écologiques locales.

L'érodibilité des sols. Contrairement à une opinion largement répandue parmi les agronomes, les sols ferrallitiques, et dans une moindre mesure, les sols ferrugineux tropicaux surtout s'ils sont gravillonnaires, semblent moins fragiles que bon nombre des sols lessivés des régions tempérées. C'est l'agressivité particulière des pluies tropicales qui entraîne les dégâts impressionnants que l'on observe en zone tropicale. Le nomographe proposé en 1971 par Wischmeier, Johnson et Cross permettant d'estimer rapidement l'indice de résistance des sols à l'érosion semble applicable à condition toutefois de lui ajouter un coefficient modérateur tenant compte des gravillons ou des débris de roches présents dans l'horizon labouré (Dumas, 1965). Enfin, il semble qu'il faille porter une attention particulière aux sols riches en argile gonflante tels que les vertisols, les sols bruns tropicaux et les sols volcaniques qui ont un comportement très spécifiques et pour lesquels cette équation ne s'applique pas.

Le facteur topographique et en particulier la longueur de la pente, constitue certainement un point faible de cette équation puisqu'il devrait varier avec le type de sol, avec la texture et le type de couverture végétale. Mais en attendant de rassembler suffisamment de données sous pluies naturelles ou simulées, il peut être utilisé dans la plupart des cas pratiques. Rappelons cependant l'importance de cette réserve pour le choix des techniques antiérosives qui font trop souvent appel à la limitation de la longueur de pente, laquelle n'est efficace que pour l'érosion en rigole et rarement pour l'érosion en nappe.

En conséquence, les techniques antiérosives du type biologique, c'est à dire favorisant la couverture du sol, sont à la fois les plus efficaces, les moins onéreuses et les mieux adaptées aux conditions des plaines et des plateaux, largement ondulés du vieux continent africain.

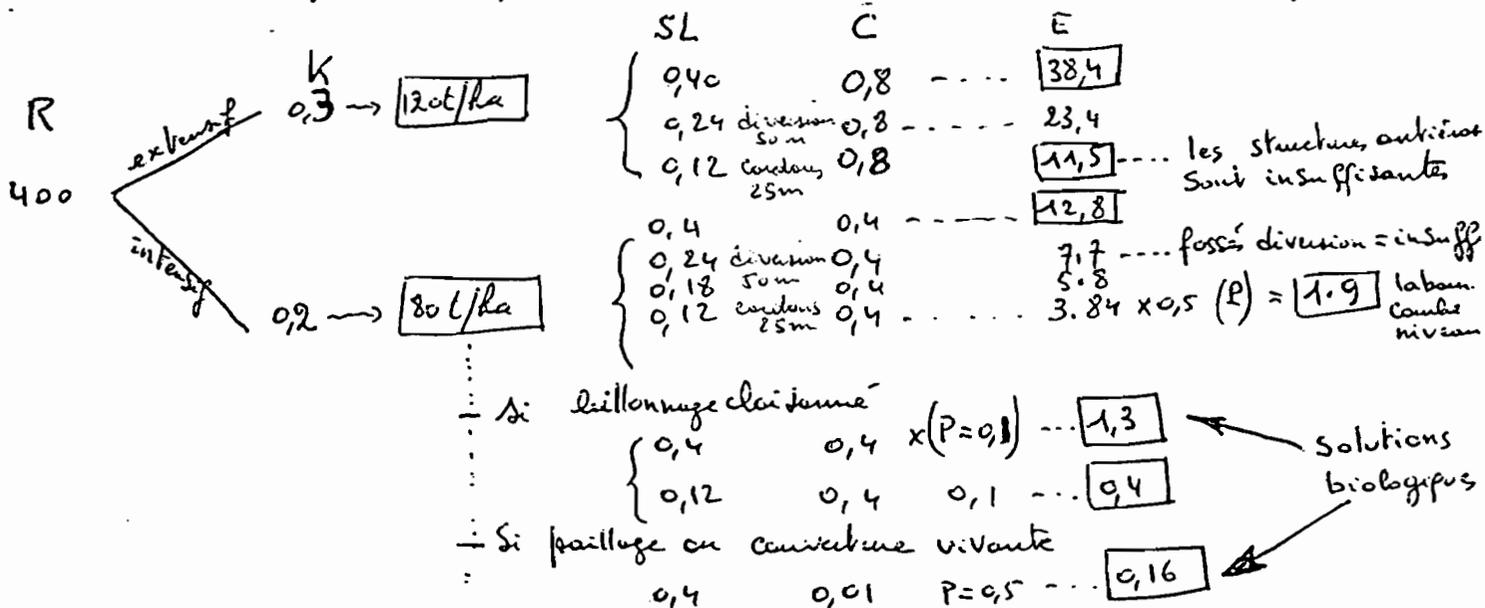
En conclusion, on ne peut attribuer le terme d'universel à l'équation de Wischmeier et Smith puisqu'elle ne s'applique ni aux sols à argile gonflante, ni aux sols volcaniques, ni aux régions montagneuses à relief jeune où l'érosion ravinante linéaire domine, ni aux zones sahariennes et méditerranéenne où la pluie exceptionnelle a une

importance décisive. Cependant cette équation de prévision de l'érosion semble bien adaptée à la majorité des terrains cultivés en Afrique de l'Ouest et en particulier aux pentes moyennes à faible, sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, argilo-sableux.

4.11. La pratique du modèle de prévision de l'érosion de Wischmeier.

Exemple en Zone Soudano Sahélienne (Ouagadougou)

- $P \approx 800 \text{ mm/an}$
- $R = 400$.
- Visons une tolérance de $< 1 \text{ t/ha/an}$
- Cherchons des systèmes de production qui y parviennent en culture } intensive et extensive



Objectif : l'objectif est de réduire l'érosion de telle sorte qu'elle ne dépasse pas l'érosion tolérable dans les circonstances du terroir où l'on travaille. Connaissant l'indice d'érosivité climatique annuel moyen R , la valeur K de l'érodibilité du sol, les rotations qu'il est souhaitable de cultiver, les pentes actuelles, on peut définir les pratiques antiérosives et chercher les structures antiérosives capables de réduire l'érosion à une valeur inférieure à l'érosion tolérable. Prenons l'exemple du Burkina Faso ou du Mali, des long glacis de la région cotonnière.

Supposons que les pluies atteignent environ 800 mm dans la région de Ouagadougou ou de Koutiala, l'indice R (USA) = environ 400. La zone de culture est située sur une pente de 2 % dont la longueur atteint 300 m. Sur le nomographe on calcule

la valeur de SL qui est égale à 0,4. Le sol est un sol ferrugineux tropical, sa valeur K varie de 0,2 au cas où il vient d'être défriché et tend vers 0,3 au bout de 5 à 10 années de culture. Il est très difficile de remonter le courant. Nous garderons donc la valeur de 0,3. Les cultures qu'il est souhaitable de développer dans ces régions, c'est une rotation bi-annuelle entre le coton et le sorgho ou le maïs. Le coton a une valeur C qui varie de 0,5 à 0,7 en culture intensive. Prenons la valeur C = 0,6 pour le coton. Pour le sorgho ou le maïs, on a une valeur en fonction des rendements qui varie entre 0,4 et 0,9. On va calculer un sorgho de 0,4 à 0,9 ; le coton de 0,5 à 0,9. On peut donc constater qu'en intensif, la valeur de la rotation sera de l'ordre de 0,4 et en extensif, de l'ordre de 0,8. Au cas où l'on voudrait rajouter en troisième année une rotation avec une légumineuse comme les arachides on ne modifierait guère la valeur du facteur C puisque la valeur C sous arachide varie de 0,4 à 0,8. Par contre, avec des niébe, la valeur C peut atteindre 0,3 grâce à la couverture rapide du sol par cette plante rampante.

Le calcul du facteur C pour la rotation coton-sorgho ; le coton varie de 0,5 à 0,9 ; le sorgho de 0,4 à 0,9 ; si l'on rajoute une arachide de 0,4 à 0,8 on peut voir qu'en intensif, la valeur tourne autour de 0,4 tandis qu'en extensif, se rapproche de 0,8. Introduisons encore la valeur de SL qui dans le cas d'une pente de 2 % et de 300 m est de 0,4 ; si nous introduisons des diguettes de diversion, nous ne changerons pas l'inclinaison de la pente, mais bien la longueur de pente. Supposons que nous mettons une diguette tous les 50 m, le facteur topographique prend alors la valeur de 0,24. Supposons par contre qu'au lieu d'utiliser la méthode de diversion nous installions tous les 50 m des bandes antiérosives ou des cordons de pierres. Nous verrons cette fois-ci la pente diminuer puisqu'à chaque cordon on peut obtenir une dénivelée de l'ordre de 25 cm. Sur 100 m nous aurons donc deux cordons et gagné 50 cm. Au cas où nous avons donc des cordons de pierres tous les 50 m, la pente sera réduite de 2 % c'est à dire 2 m tous les 100 m à 1,50 m. La pente sera donc de 1,5 %, la longueur de 50 m, la valeur sera de 0,18. Si nous réduisons l'écart jusqu'à 25 m, cette fois nous aurons 4 cordons tous les 100 m, nous aurons donc gagné 1 % de pente et pour une pente de 1 % et de 25 m de long, cette fois, la valeur de SL est réduite à 0,12. L'érosion devient donc dans les 8 cas définis jusqu'ici, l'érosion varie de 30,7 à 3,8 t/ha/an en moyenne.

Au cas de culture extensive connue jusqu'ici, sans aucune limite de pente, avec un sol dégradé et des techniques culturales extensives, l'érosion = $400 \times 0,3$ pour le sol, 0,8 pour le facteur C ; 0,4 pour SL, l'érosion estimée en milieu extensif = 38,4 t/ha/an. Si on entre dans le système intensif, la valeur C descend à 0,4 sans changer. Sans intervenir pour la réduction de la longueur de pente, on obtient une érosion de 19,8 tonnes. Au cas où on introduit tous les 50 m une diguette de diversion, le facteur SL descend à 0,24, l'érosion devient : 7,7 t. Au cas où on introduit un microbarrage

perméable tous les 50 m, la pente diminue et le facteur SL devient : 0,18 ; l'érosion atteint 5,8 t/ha et au cas où on introduit tous les 25 m un cordon, la pente est réduite à 1 % ; SL tend vers 0,12 et l'érosion à 3,8 t. On constate donc que l'effet des structures antiérosives est tout à fait insuffisante pour réduire l'érosion à un niveau tolérable qui dans le cas de ces sols est à peine de 1t/ha/an. Si l'on tente d'installer la culture en courbe de niveau à ces pentes, le facteur P est égal à 0,5 et l'érosion tombe à 4,9 t/ha ce qui est encore trop. Si l'on tente le billonnage en courbe de niveau, l'érosion tombe à 1,44 et si l'on fait un billonnage cloisonné, on obtient une valeur enfin inférieure à 1 t de 0,38 t/ha/an. Voici une première solution.

La deuxième solution, c'est d'introduire au facteur C, un paillage ou une couverture morte ; le facteur C tend alors vers 0,01 et sans aucune structure ni aucun travail particulier du sol, l'érosion tombe à une valeur de 0,16 t/ha/an. Voici donc une deuxième solution au problème. Dans cet exemple on peut voir que la méthode des barrages perméables est nettement plus efficace que celle des fossés de diversion mais encore nettement insuffisante ainsi que l'ensemble des méthodes mécaniques. Seul le billonnage cloisonné permet d'aboutir rapidement sur ces faibles pentes à une diminution de l'érosion. Par contre, les méthodes biologiques permettent de réduire de façon considérable l'érosion qu'il s'agisse d'une part d'intensifier l'exploitation, donc le couvert végétal et l'on réduit l'érosion par 2. Si on introduit un paillage ou une couverture morte ou des résidus à la surface du sol, on peut diviser l'érosion par 100.

5 - L'EROSION LINEAIRE

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques ; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, lorsqu'ils ont dépassé 25 cm par seconde, ces filets d'eau acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable de cisailer le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses : non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers et plus tard des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines.

5.1. LES FORMES D'EROSION LINEAIRE

Dès qu'il y a ruissellement, s'organisent les transports des particules légères, en particulier les matières organiques, les résidus de culture, les déjections animales et également des transports des particules fines, argile, limons et sables. A la surface du sol on peut observer des délaissées de crues composées souvent de matières organiques longues et fibreuses ou alors de dépôts sableux organisés en filets comme dans les oueds. L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de **griffes** lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de **rigoles** lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales. On parle de **nappe ravinante** lorsque la profondeur des creux ne dépasse pas 10 à 20 cm mais que la largeur atteint plusieurs mètres. Enfin on parle de **ravines** lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (+ 50 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales. A l'intérieur des ravines on peut encore distinguer des **petites ravines** dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques. Par contre, dans des **grandes ravines** qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres et atteindre des bassins versants de plusieurs km², sur ces grandes ravines, le canal central comporte des transports importants, en particulier des transports de fonds qui représentent un signe d'une certaine **torrentialité**. Ces fonds étant mobiles, il n'est plus question de les stabiliser uniquement par des méthodes biologiques ; il sera nécessaire d'utiliser des seuils et des méthodes mécaniques (voir Lili, Koohafkan, 1987).

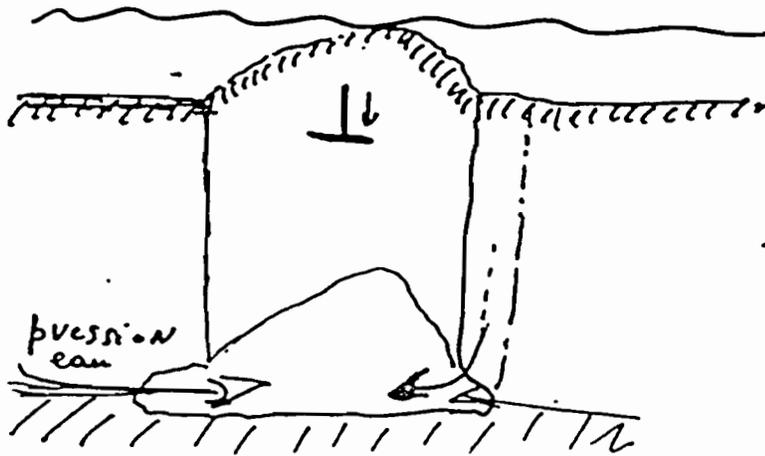


Ravine à la plantation d'ananas de la Sulci
à ONO (base Côte d'Ivoire)

(photo Kasse)

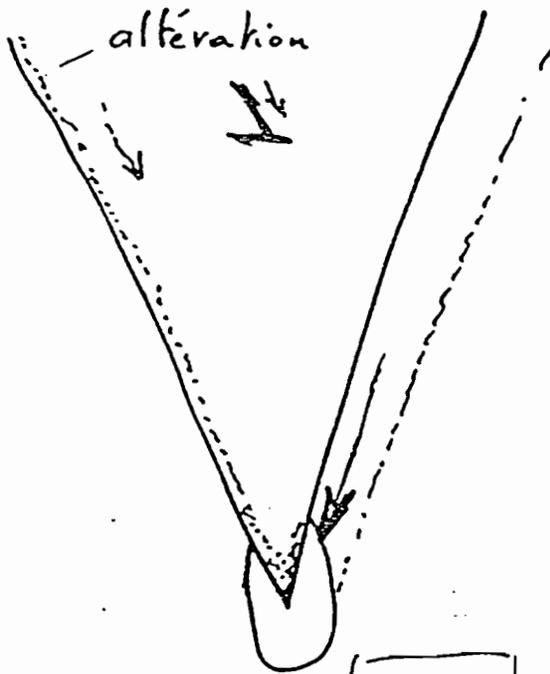
Figure 26. Les formes d'érosion linéaire

3 processus de RAVINEMENT



flancs de ravine
en U

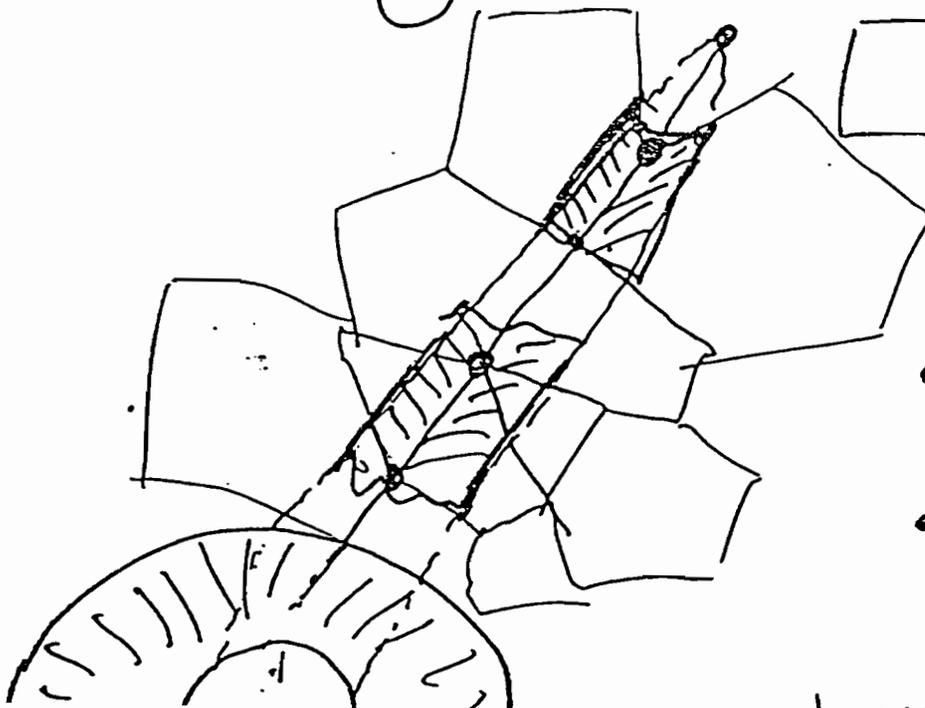
- Sapement à la base
- éboulement
- évacuation
- ex. LAVAKA à Madagascar.



flancs de ravine
en V

- altération des versants
- débit \rightarrow Sapement
- chasse des colluvions
- éboulement

ex. marnes voir Drais Algérie



en tunnel

- infiltration de fissure de sol (vertisol).
- érosion sous le sol en tunnel
- effondrement et progression de la ravine

Il est également intéressant de noter la forme de ces ravines. Certaines sont en V à pente constante jusqu'au fond, d'autres ont des bordures verticales et sont en U, enfin d'autres ravines évoluent par tunnel et effondrement. On parlera de grosses ravines ou de ravines à fonctionnement torrentiel lorsque la violence et la fréquence des crues, l'importance du charriage, ne permettent pas d'envisager la végétalisation du fond de la ravine dans un délai raisonnable. L'examen du lit permet de compléter les diagnostics. Le lit de ravine à fonctionnement torrentiel est généralement encombré d'alluvions grossières et sa colonisation par la végétation ligneuse est réduite. Par contre, dans les petites ravines relevant d'un traitement biologique, les alluvions sont plus fines et la végétation ligneuse colonise encore certains tronçons, au moins tant que la dégradation de cette végétation n'est pas trop poussée du fait de la mise en culture" (Lilin, Koohafkan, 1986).

5.2. LA CAUSE ET LES PROCESSUS DE L'ÉROSION LINÉAIRE

La cause de l'érosion linéaire est à chercher dans l'énergie du ruissellement, laquelle dépend à la fois du volume ruisselé et de la vitesse de celui-ci.

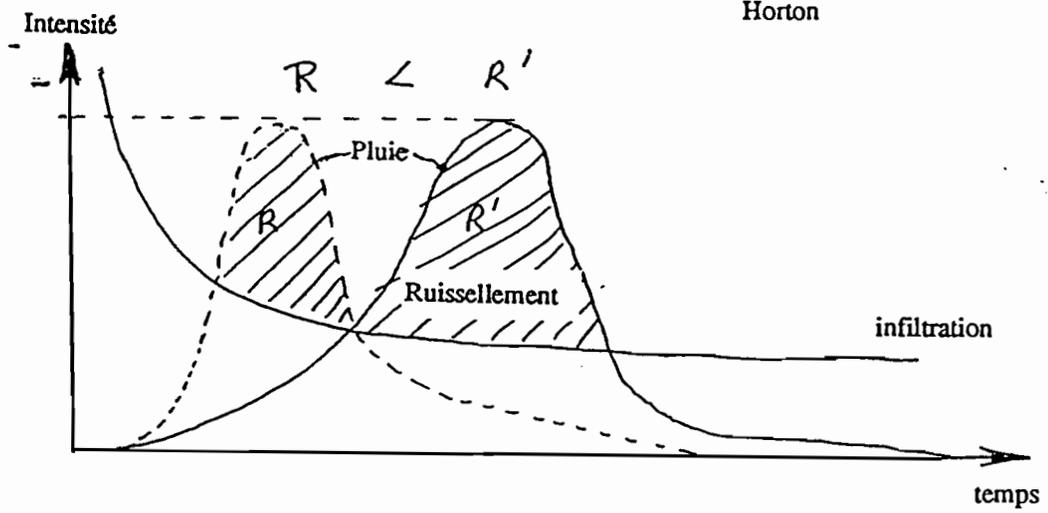
$$E_{\text{Ruiss}} = 1/2 MV^2 \text{ sur parcelle} = 1/2 MGH \text{ sur bassin versant}$$

5.2.1. Trois théories pour expliquer la naissance du ruissellement

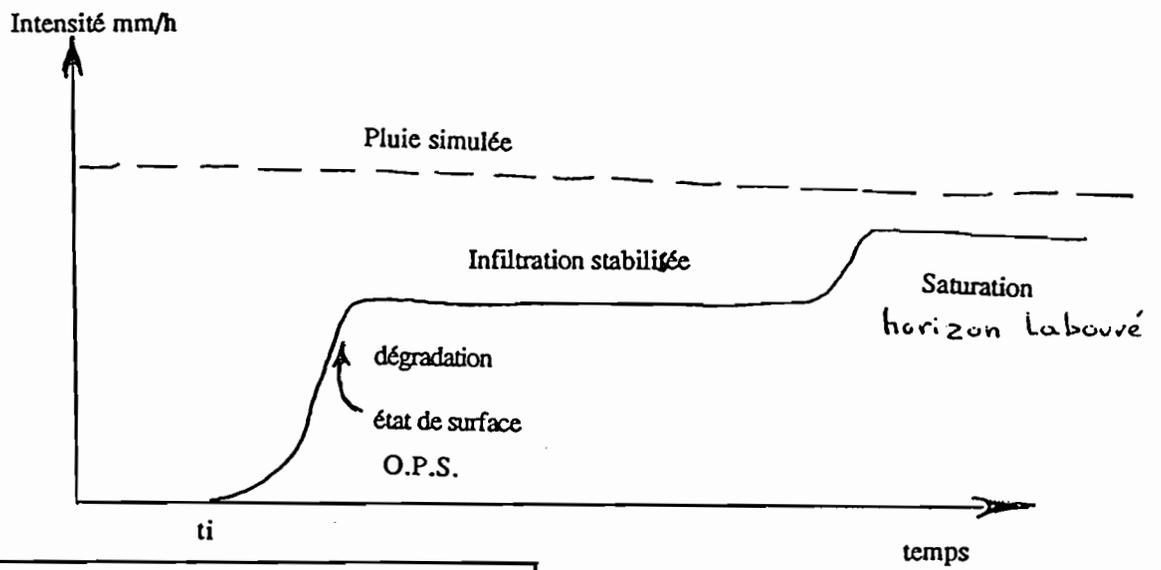
- 1°) **Théorie de Horton (1945)** : le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol (voir fig. 27). Si on compare l'intensité de la capacité d'infiltration à celle de la pluie, on constate que l'intensité d'infiltration décroît au cours du temps, d'une part par ce que le potentiel capillaire diminue à mesure que le front d'infiltration descend à l'intérieur du sol et d'autre part, par dégradation de l'état de la structure à la surface du sol. Par contre, l'intensité de la pluie passe généralement par un maximum et le volume de la pluie situé au-dessus de la courbe d'infiltration peut être considéré comme le ruissellement. On constate dans l'exemple choisi, pour une séquence d'intensité voisine que le volume du ruissellement peut varier considérablement en fonction de la période où apparaît le maximum d'intensité dans l'averse. Plus tôt apparaît ce maximum, plus réduit sera le ruissellement puisque la capacité d'infiltration diminue au cours du temps. Cependant, les hydrologues ont montré qu'il était rare d'obtenir une bonne corrélation entre le volume ruisselé et l'intensité des pluies. Par conséquent, on a cherché une autre explication.

FIG. 27 - NAISSANCE DU RUISSELLEMENT

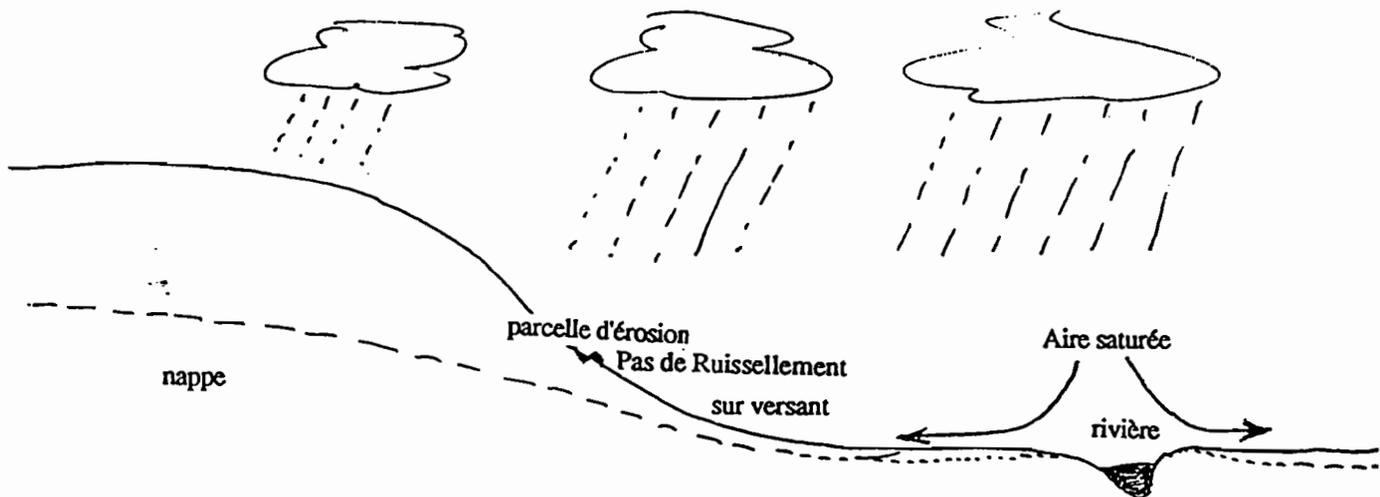
A Si Intensité pluie > Infiltration



B Si la porosité du sol est saturée



C Contribution localisée du Ruisseau



- 2°) **Le ruissellement naît lorsque la porosité du sol est saturée** (voir fig. 27). Si au cours d'une pluie simulée on constate d'abord le démarrage du ruissellement après une pluie d'imbibition, le ruissellement va augmenter jusqu'à atteindre un niveau stabilisé correspondant à la capacité d'infiltration stabilisée du sol. Mais si la pluie persévère (plus de 100 mm), il peut arriver que l'on observe une nouvelle croissance du ruissellement et un nouveau plateau d'infiltration stabilisée. Il s'agit simplement de la saturation de l'horizon labouré ; il provoque le débordement de cette capacité de stockage que représente la macroporosité de l'horizon labouré. On peut constater soit que l'intensité de ruissellement correspond exactement à celle de la pluie simulée si l'horizon de profondeur est totalement imperméable ou qu'il reste une certaine capacité d'infiltration résiduelle correspondant à celle du fond de labour. Lorsqu'un milieu est totalement saturé, toute goutte d'eau tombant dans ce milieu ruisselle, quelle que soit l'intensité de la pluie.
- 3°) **Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement.** A la figure 27, on constate que le ruissellement observé au niveau de la rivière est fonction de la surface du sol saturé au fond de la vallée. Si au cours de la saison sèche on mesure, lors des orages, le ruissellement circulant sur le versant, on constate qu'il n'y a pas de ruissellement sur le versant alors que la rivière réagit très rapidement à ces orages. Le volume ruisselé, par contre est réduit pendant cette période sèche car la surface saturée du fond de vallée est très étroite, souvent réduite au lit mineur. En fin de l'hiver, par contre, lorsque tout le volume de la couverture pédologique a été réhumecté jusqu'à capacité au champ, la moindre averse réalimente la nappe, laquelle va latéralement saturer une surface plus grande de la vallée. Par conséquent, même s'il n'y a pas de ruissellement sur le versant, cette fois, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume ruisselé par la rivière par extension de la surface saturée et pression au niveau de la nappe, alimentée directement par le drainage de l'ensemble du bassin.

En fonction de l'origine du ruissellement, la lutte antiérosive devra donc s'organiser différemment. Si comme dans le premier cas, le ruissellement provient de la dégradation de l'état de la surface du sol, la lutte antiérosive devra s'organiser essentiellement en protégeant cette surface du sol par la couverture végétale ou en retardant la formation de pellicule de battance.

Si par contre, le ruissellement s'organise à partir de la saturation du sol, il est peu utile de couvrir ce sol pour favoriser l'infiltration, au contraire, il importe d'organiser un certain drainage. Enfin, si le ruissellement ne se manifeste que localement sur un bassin versant, il est inutile d'organiser des banquettes de diversion sur les versants et les pentes fortes, puisqu'il s'y trouve très peu de ruissellement. On comprend la présence de très nombreux échecs dus à la simple application de recettes mises au point dans certaines régions écologiques du globe, généralement tempérées et appliquées ensuite dans des zones très différentes, par exemple, les banquettes de diversion en région méditerranéenne et les diguettes de diversion en région soudano-sahélienne.

5.2.2. Le développement des ravines

Le long d'un versant, l'énergie cinétique des gouttes de pluie est une constante à ceci près, qu'elle dépend de la vitesse du vent. Par contre, le ruissellement tend à s'accumuler et à s'organiser lorsque la longueur de pente augmente. Si le débit de pointe augmente, on observe le cisaillement de la surface du sol formant une rigole. Celle-ci va évoluer d'une part par un grattage du fond par les sédiments transportés par le fluide et d'autre part, par effondrement des berges et transport du matériau ainsi désorganisé.

Dans la nature, on observe le plus souvent des ravines en forme de V qui s'impriment dans un matériau homogène, plus ou moins meuble, sablo-argileux ou argileux-marneux, ou schisteux. Les versants de ces ravines évoluent par altération : en saison froide par alternance de gelées et de soleil, en saison chaude, par alternance de sécheresse et d'averses. On observe en milieu méditerranéen une altération des marnes et des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an. L'enfoncement a lieu lors des averses exceptionnelles qui d'une part, dégagent les particules fines qui encombrant le fond de ces ravines et d'autre part, les ravines en V s'approfondissent lors des averses rares. Une à deux averses par an suffisent pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour cisailier le fond de la ravine par abrasion des matériaux que le ruissellement charrie.

Au cours des saisons intermédiaires, les matériaux fins accumulés sur les versants par altération des roches, glissent jusqu'au fond de la ravine, d'une part suite à la battance des gouttes de pluies, et d'autre part par formation de petites rigoles secondaires ou le plus souvent par glissement en masse des particules saturées par l'eau et ayant dépassé le point de liquéfaction. La pente d'équilibre des versants étant largement dépassée, aucune végétation ne peut s'y installer. La lutte antiérosive va donc s'attacher à stopper l'enfoncement du fond de la ravine et à rétablir la pente d'équilibre sur les versants.

Un deuxième type de ravine en U s'observe fréquemment dans la nature sur des **matériaux hétérogènes**. Soit elles ont un fond plat car celui-ci est constitué de matériaux très résistants. Lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Ou bien la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement alors creuse profondément le matériau jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente qui va exercer une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre. Ici également il sera nécessaire de fixer le fond de la ravine, de retenir les sédiments jusqu'à obtenir une pente d'équilibre des versants.

Il existe enfin une forme de ravinement encore plus délicate à traiter. Il s'agit des formes en tunnel qui peuvent se développer dans un matériau fissuré en surface, quelquefois sur des pentes très faibles. Il s'agit soit de sols riches en argile gonflante (montmorillonites). Sur ces sols, en fin de saison sèche, les eaux s'infiltrent par des fissures qui descendent jusqu'à la roche altérée, les eaux circulent dans le sol à l'intérieur de ces fissures jusqu'en bas de pente, transformant ainsi ces fissures en tunnels. Un autre cas est fréquent dans les marnes lorsque ce matériau est riche en gypse ou en autres minéraux solubles. La mégaporosité dans les deux cas, dans lesquels s'engouffrent les eaux de ruissellement, va se transformer en tunnel qui finalement va s'effondrer au cours des grosses averses, former des ravines qui sont remontantes dans le paysage (tunneling).

5.3. LES FACTEURS DU RUISSÈLEMENT

L'énergie du ruissellement est égale à $1/2 MV^2$ ou est égale à $1/2 MGH$ à l'échelle du bassin versant.

Quels sont les facteurs qui font varier le volume ruisselé ?

C'est tout d'abord les pluies : la hauteur des pluies au cas où le ruissellement naît d'un engorgement du sol, ou l'intensité des pluies en 30 mn (voir Wischmeier et Smith (1960), Roose, 1973) qui règle la battance et la naissance du ruissellement, ou sur les fortes pentes, intensité maximale en 15mn (ex. : Equateur, voir De Noni et Pourut, 1988).

En Rhodésie, Hudson considère sur les oxisols très résistants à l'érosion, que les pluies n'entraînent pratiquement pas de ruissellement et d'érosion lorsque l'intensité des pluies est inférieure à 25 mm/h. Il existe donc des intensités limites de pluie en-dessous desquelles le milieu perméable ne peut ruisseler (voir Casenave et Valentin, 1989 et Rahéliarisoa, 1985). Au simulateur de pluie, Lafforgue et Naah (1976) ont montré que la capacité d'infiltration du sol augmente si l'intensité des pluies augmente dans le cas d'une surface rugueuse du sol. Par contre, si le sol constitue un plan homogène finement poudreux, l'augmentation de l'intensité de la pluie ne joue pas sur l'infiltration.

Deuxième point : l'humidité préalable du sol.

Celle-ci s'exprime, soit par le temps en heures qui s'est écoulé avant la pluie, soit par l'indice de Köhler. Lorsque les sols sont secs, la pluie d'imbibition est généralement nettement supérieure aux mêmes intensités que lorsque le sol est humide. On passe souvent d'une pluie d'imbibition de 10 à 40 mm en sol sec jusqu'à 1 à 10 mm en sol humide. Il y a une interaction entre l'état structural du sol et l'humidité préalable du terrain. Boiffin (1984) et Rahéliarisoa (1983) ont montré qu'une simulation de pluie sur un sol limoneux sec peut entraîner une dégradation superficielle du sol plus rapide que si les mêmes pluies tombent sur des parcelles déjà humectées (voir le graphique de Boiffin).

Le troisième point réglant le volume ruisselé est la surface du bassin versant drainé par le même canal (voir résultat de Stocking au Zimbabwe en 1978).

Le quatrième point est l'état de la surface du sol que l'on peut décomposer en rugosité de la surface du sol, qui influence surtout la pluie d'imbibition mais dont l'influence diminue lorsque la pente augmente. En effet, le volume stocké dans les flaques diminue sur les fortes pentes.

Lorsque la surface des sols se dégrade, les mottes fondent et forment à leur surface une pellicule structurale de faible épaisseur, réduisant ainsi l'infiltration à quelques mm/h ou quelques dizaines de mm/h. Mais les croûtes de sédimentation qui envahissent le terrain à partir des flaques entre les mottes peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur et des capacités d'infiltration extrêmement réduites: de 0 à 10 mm/h. Le ruissellement d'une parcelle va donc dépendre de la surface couverte par les différents types de pellicules et par les macroporosités qui restent ouvertes entre les mottes à la surface du sol. Enfin, l'état d'humidité initiale du sol a une influence à la fois sur la pluie d'imbibition et sur la capacité finale d'infiltration.

L'inclinaison de la pente, généralement, diminue le volume ruisselé car sur forte pente, on observe un meilleur drainage interne et une formation plus lente des pellicules de battance, qui sont détruites au fur et à mesure par l'énergie du ruissellement. Le facteur longueur de pente intervient également sur le volume ruisselé, mais si théoriquement, ce volume en pourcentage reste constant le long de la pente, il apparaît dans de nombreux cas où les sols sont dénudés, que le coefficient de ruissellement diminue lorsque la pente augmente (voir Roose, 1973 et Lafforgue-Valentin, 1986).

Autre point important, l'hétérogénéité de la surface sol-air. Au paragraphe de la rugosité il faut faire intervenir l'effet des techniques culturales lesquelles peuvent augmenter de façon considérable l'infiltration. Ex. : à Pouni, la comparaison de l'infiltration sur un sol nu non travaillé, sur les mêmes sols piochés avec résidus de culture ou en billonnage cloisonné. L'infiltration d'une pluie de 120 mm passe de 35 mm à plus de 104 mm d'infiltration. On peut citer aussi les essais menés au Pas de Calais sur l'effet du nombre de passages des outils. Soulignons également l'effet de la mésofaune à Saria. Nous avons mesuré sur 100 cm² l'infiltration finale d'une lame d'eau de 100 mm qui était de l'ordre de moins de 12 mm/h sur le sol nu encroûté, de l'ordre de 60 mm/h au cas où il y avait un trou de termites, atteignait 90 mm/h après avoir enlevé la croûte de battance et enfin 120 mm/h d'infiltration finale après avoir pioché le sol sur 5 cm. Les trous de vers de terre et dans certains cas, les trous de termites peuvent avoir une influence considérable sur l'infiltration dans les sols puisque les débits dans un tuyau varient en fonction de la cinquième puissance du diamètre de ces tuyaux. Un pore de 2 mm débitera 32 fois plus qu'un pore de 1 mm, or les canalisations laissées par les vers de terre et les termites dépassent souvent 4 mm de diamètre.

Le deuxième facteur, qui peut jouer pour réduire ou augmenter l'énergie cinétique du ruissellement, est la vitesse de celui-ci. Cette vitesse dépend d'une part de la pente du canal et d'autre part, de sa rugosité. La pente augmente la vitesse de l'écoulement et donc la vitesse d'avancement de la ravine mais le ravinement peut très bien commencer sur des pentes inférieures à 1 %. Ex. : Burkina Faso (diapositive dans la région du lac de Loumbila).

Un point important est également la position dans la topographie (Heusch, 1970). En effet les eaux peuvent drainer en profondeur jusqu'à atteindre le fond de la vallée mais au niveau d'affleurement des nappes, il peut se développer du ravinement qui entraîne par la suite une érosion régressive.

Enfin, il faut noter la différence d'altitude qui va régler la profondeur des ravines ; en effet, la hauteur de chute des eaux dans la ravine, entraîne une énergie de tourbillon considérable, laquelle va accélérer la vitesse d'érosion ou la vitesse d'avancement des têtes de ravines.

Signalons enfin les études de Stocking sur la vitesse d'avancement des ravines au Zimbabwe. Après avoir étudié différents types de ravines, il constate d'une part que quel que soit le type de ravine, l'érosion est fonction :

- 1) du volume des précipitations, c'est à dire P en mm ;
- 2) de la surface du bassin en km² donc des risques de volumes ruisselés ;
- 3) de la hauteur de chute en tête de ravine (H). L'équation s'écrit :

$$\text{Erosion de ravine} = 6.87 \times 10^{-3} P^{1.34} \times S^1 \times H^{0.52}$$

Autre facteur qui intervient pour régler l'érosion ravinante, c'est le **couvert végétal**.

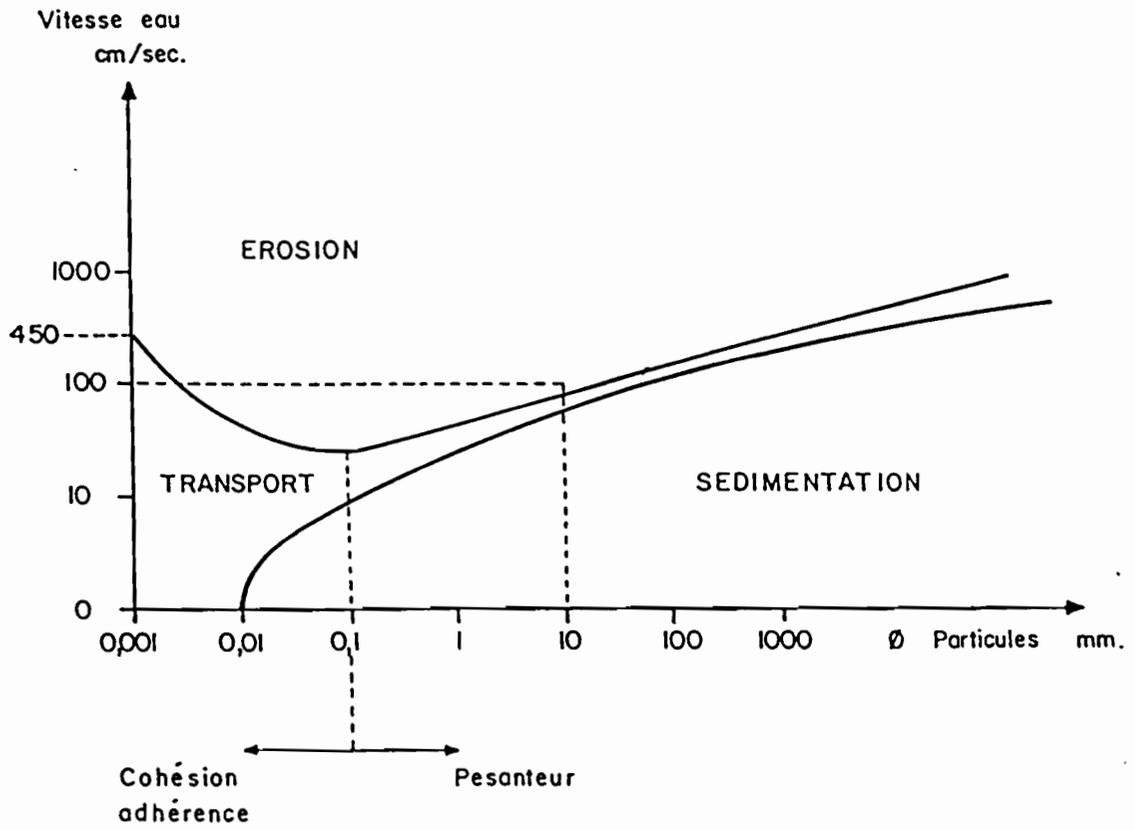
- 1° - Le couvert végétal, d'une part protège contre la battance des pluies, donc prolonge la perméabilité du sol.
- 2° - Sa litière entretient la mésofaune, laquelle creuse la macroporosité et absorbe une grande quantité d'énergie de ruissellement.
- 3° - La rugosité au sol dépend du nombre de tiges. C'est ainsi qu'une couverture végétale formée d'herbacées à tiges nombreuses est plus efficace pour protéger le sol contre le ruissellement que des arbres.

Autre facteur : le sol.

La rugosité de la surface du sol réduit la vitesse de ruissellement et intervient également sur le volume stocké. La stabilité de la structure du sol aura une influence sur la vitesse de la battance et par conséquent, la pluie d'imbibition. Si la surface du sol contient des graviers ou des roches, on observe deux effets opposés (voir Poesen, 1990, Valentin et Figueroa, 1986). Soit, ces cailloux sont posés à la surface du sol ; ils protègent celle-ci contre le splash et protègent la macroporosité sous-jacente. Ces cailloux vont avoir une influence positive sur l'infiltration. Par contre, si ces cailloux sont inclus dans les croûtes de sédimentation ou de battance, on observe une augmentation du ruissellement. Enfin, si les sols sont tassés, ils seront moins perméables mais plus cohérents et par conséquent ils résisteront mieux aux courants d'érosion. Enfin, au niveau du profil du sol, si le profil est homogène, l'érosion va donner une ravine en V, si au contraire le profil est hétérogène, le profil va évoluer en U avec des faces verticales, la vitesse de l'érosion sera fonction de la résistance du matériau au cisaillement.

Hjulström en 1935, a étudié l'érodibilité des matériaux terreux en fonction de leur texture et de la vitesse des écoulements dans des canaux. Dans un graphique (4.28) figurant la vitesse des écoulements en fonction de la taille des particules, Hjulström a montré qu'il existait trois zones : la zone inférieure de sédimentation, la zone supérieure passant par un minimum vers 100 microns, zone d'érosion, et entre les

FIG. 4.28 - DIAGRAMME DE HJULSTRÖM



deux, une zone de transport. L'érosion démarre pour une vitesse minimum de 25 cm par seconde lorsque la texture du matériau des berges est d'environ 100 microns, c'est à dire la taille des sables fins pour lesquels le poids est plus faible que le sable grossier et les cailloux et l'adhérence est plus faible que pour les limons et les argiles. La vitesse minimum de l'eau provoquant l'érosion est de l'ordre de 25 cm/seconde. On constate donc que les matériaux les plus fragiles, ici des sables fins, sont légèrement plus grossiers que dans le cadre de l'érosion en nappe, pour lequel les matériaux les plus fragiles sont compris entre 10 et 100 microns. Voilà pourquoi le ruissellement en nappe qui se déplace à moins de 25 cm/sec n'entraîne le déplacement que des particules fines et des particules légères détachées par la battance et laisse sur place les sables grossiers. Par contre, lorsque le ruissellement est concentré, l'érosion n'est plus sélective, la vitesse augmente, l'énergie du fluide également, qui creuse des rigoles. Lorsque la pente augmente, l'énergie du ruissellement augmente et devient supérieure à l'énergie de l'érosion en nappe. La forme d'énergie évolue vers la formation de rigoles et de ravines, c'est à dire un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles.

Autre observation, le domaine du transport dans les textures sableuses est très étroit. Cela signifie qu'on passe facilement du domaine de l'érosion à la sédimentation lorsque la vitesse du ruissellement diminue : d'où les dépôts sableux qui encombrant très souvent les canaux - par exemple les canaux de diversion, en particulier à la fin de chaque crue. Ceci est particulièrement frappant dans les rivières (Mayo) de la zone soudano-sahélienne du Cameroun dont les lits sont encombrés de sables grossiers.

5.4. LA LUTTE CONTRE LE RUISSellement ET L'EROSION LINEAIRE.

Elle consiste à réduire la vitesse du ruissellement et progressivement son volume.

5.4.1. Aux champs.

Il est possible, par l'adaptation des techniques culturales et du couvert végétal de réduire le volume de ruissellement issu du champ. On a vu que le labour profond permet un meilleur enracinement, un meilleur stockage de l'eau en profondeur et donc un meilleur développement du couvert végétal, lequel entraîne une baisse significative de l'érosion et du ruissellement. Une autre approche consiste au contraire à ne jamais laisser nue la surface du sol, à travailler le sol au minimum et toujours localement sur la ligne de semis. Là aussi on

constate que les eaux s'infiltrent par les macropores créées par la mésofaune et on constate une très faible érosion. Là où les vers de terre et les termites sont présents, ils vont consommer la litière déposée à la surface du sol, creuser des macropores et maintenir une excellente infiltration.

5.4.2. Dans les vallées sèches, les petites ravines et dans les fonds de vallées de drainage, il suffit bien souvent de ne pas cultiver le terrain, mais de maintenir les terrains tassés sous prairie pour réduire les dégâts par érosion. On peut aussi installer "en V" au travers de ces vallées des obstacles vivants tels que des haies ou des obstacles morts tels que des balles de paille. Enfin, une autre solution mais coûteuse celle-ci, consiste à creuser des étangs d'orage ou à construire de petits barrages collinaires destinés à écrêter la crue, à intercepter les transports solides pour éviter que ces boues ne viennent dégrader les terrains habités. Il faut cependant considérer que cette méthode est coûteuse car elle immobilise du terrain et nécessite un curage régulier (voir Ouvry, 1990 dans le Pays de Caux).

5.4.3. La fixation biologique des petites ravines (voir Lilin, Koohafkan, 1987).

"L'activité des petites ravines est très variable d'une région à l'autre en fonction du stade de dégradation atteint. Si la végétation ligneuse constitue encore une armure défendant les bas-fonds, mais que celle-ci donne localement des signes de faiblesse, il convient simplement d'accorder une importance aux mesures préventives et de réduire le développement agricole dans les bas-fonds. Par contre, une fois que la ravine a commencé à s'inciser, il faut restaurer l'équilibre rompu.

On peut distinguer deux objectifs pour ces types d'aménagement.

L'objectif principal sera généralement l'amélioration de la productivité agricole ou forestière par la mise en valeur des atterrissements créés derrière chaque seuil dans le bas fond. Comme les phénomènes torrentiels sont peu importants, ces atterrissements ont souvent un potentiel productif élevé. A mesure que la terre s'accumule en amont du seuil, on peut y planter toutes sortes d'arbres fruitiers (exemple en Haïti : des arbres à pain, des manguiers, des cocotiers et des bananiers) ou bien des espèces vivrières exigeantes en eau.

Le deuxième objectif est la réduction du débit solide et la régularisation des écoulements. Il concerne surtout les secteurs situés à l'aval de la zone traitée. Compte tenu des conditions écologiques et du matériel végétal disponible, l'accent doit être mis sur le traitement biologique des petites ravines. L'outil de base est un seuil placé en travers de la ravine et constitué par du végétal vivant. Cet aménagement s'inspire de la technique des haies vives issues de grandes boutures rapprochées, utilisée par les paysans

pour clôturer les parcelles cultivées et les protéger contre le bétail. Cette dernière technique largement répandue en Haïti comme au Rwanda et au Burundi est bien maîtrisée par les paysans mais il convient de l'adapter aux problèmes spécifiques du traitement des ravines.

La construction d'un seuil fait appel à divers types de matériel végétal. Soit des grandes boutures d'espèces ligneuses, soit des plantes comme le sisal et des graminées pour mieux freiner l'eau et protéger l'aval de l'ouvrage contre l'afouillement. Le choix des espèces doit être guidé par leur adaptation aux exigences du traitement des ravines : résistance à une vitesse importante de l'eau, aux chocs et à l'écorçage comme à l'afouillement et à la submersion. Vitesse de croissance élevée : en Haïti, on peut faire usage de l'*Euphorbia lactea*, divers sisals, *Bromelia*, *Glyceridia cepium*, le Yucca, *Bambousa vulgaris*, le Goyavier, le *Jatropha curcas*, les *Cassia* et le *Leucaena leucocephala*. Mais dans chaque région il convient d'adapter cette liste de plantes utilisables et de préciser leurs conditions d'adaptation ainsi que les modalités de la production d'éclats ou de boutures et de plants racinés.

Après installation d'une haie vive en travers du lit, le filtre chargé de favoriser le dépôt des sédiments transportés par l'eau, est réalisé au moyen de branchages s'appuyant sur les plants installés. L'élévation de ce filtre doit suivre le rehaussement de l'atterrissement et la croissance des végétaux de la haie vive. En Haïti, pour la fixation des seuils il est souhaitable d'utiliser des boutures de l'ordre de 1,2 à 1,5 m dont 50 cm seront enterrés. Lorsque les conditions sont favorables, les boutures constituant le seuil peuvent être plantées directement au travers du lit, sans précaution en une ou deux rangées à faible écartement, environ 30 cm entre les boutures. Dans certains cas, la reconquête du lit actif de la ravine doit être entreprise à partir des deux berges ; en particulier lorsque les colluvions sont régulièrement déblayées par les crues, lorsque la hauteur d'eau lors des plus fortes crues arrache la végétation. Dans ces conditions, il peut être possible de végétaliser la ravine en s'appuyant sur les arbres poussant sur les deux berges : par exemple en pliant deux boutures des berges opposées et en installant par dessous des corbeilles tressées remplies de terre ou des vieux pneus avec des boutures fixées dans ces corbeilles et sur les boutures initiales. De cette façon, on crée d'emblée des conditions plus favorables au démarrage de la végétation.

Lorsque le ravinement est déjà trop avancé, la technique consiste à construire un petit seuil en pierres sèches avant la plantation des ligneux. Ce seuil crée par son atterrissement un milieu favorable à l'installation des plants. Par ailleurs, il étale la nappe d'eau s'écoulant dans la ravine lors des crues et aide ainsi le seuil végétal à mieux résister à l'arrachage. Lorsque les pierres sont rares elles peuvent être remplacées par des sacs de récupération remplis de terre et protégés par une petite couche de cailloux ou de

ciment ou simplement de terre surtout s'il s'agit de sacs plastiques dont la dégradation est accélérée par l'exposition aux rayons ultra violets. Ces seuils en pierres ou en sacs de terre ont un rôle provisoire, la végétation du seuil biologique prenant ensuite le relais pour maîtriser le ravinement. Il n'est pas nécessaire de leur donner une hauteur importante : 50 cm à 1 m à la cuvette doit suffire.

Une fois ces petits ouvrages construits, il convient de veiller à leur entretien :

- réparation des points faibles du seuil par plantation complémentaire,
- addition d'un filtre en résidus végétaux,
- prévention du contournement de l'ouvrage en installant une végétation protectrice le long des berges renforcées si besoin par la mise en place de branchages,
- prévention de l'afouillement à l'aval en limitant la hauteur de l'ouvrage et en installant certaines espèces à son pied : des agaves, des espèces fourragères à fort développement.

Cet entretien généralement, ne peut être assuré par les agents de l'Etat, mais ce sont les paysans qui peuvent en assurer l'entretien au cas où ces seuils ont un impact suffisant sur la productivité agricole du bas fond. L'espacement entre les seuils de correction d'une petite ravine n'a pas besoin d'être calculé comme dans le cas du traitement des ravines importantes à fonctionnement torrentiel. En effet, l'épaisseur des alluvions est en général faible et de ce fait, lors du surcreusement local dû à la destruction d'un ouvrage, l'érosion régressive progresse moins vite vers l'amont que lorsqu'elle travaille dans des alluvions profondes. L'aménageur dispose donc d'une certaine souplesse dans la localisation des ouvrages. Il pourra en particulier démarrer le traitement là où la tenure des terres est bonne et où les propriétaires riverains sont disposés à collaborer entre eux. En principe il faut intervenir en priorité sur les tronçons amont, là où les chances de réussite sont supérieures, compte tenu d'une torrencialité moindre. Une fois ces secteurs aménagés, le traitement de l'aval sera plus facile.

Deuxième priorité, il faut intervenir sur les tronçons de ravines propices à une certaine mise en valeur : configuration topographique permettant de créer un atterrissement important pour un même type d'ouvrage, proximité du village et accessibilité facilitant la surveillance et l'écoulement des récoltes."

5.4.4. Les grosses ravines torrentielles (voir Lilin et Koohafkan, 1987).

"Dans les grosses ravines à fonctionnement torrentiel, le barrage de correction torrentiel est l'outil de base de l'aménageur. L'aménagement peut avoir deux objectifs :

1 - **Stabiliser le profil en long** de la ravine dans les secteurs où la tendance générale est au surcreusement. Ces ouvrages retiennent surtout la partie du versant qui serait peu à peu descendue dans la ravine (par sapement de berges et par glissement) si l'incision s'était poursuivie. Ils arrêtent l'érosion régressive au niveau de la ravine ainsi traitée.

L'objectif n'est donc pas ici de retenir beaucoup de sédiments.

2 - **Retenir les sédiments** dans les sections en transit où l'incision est faible. De "sous-produit", la fonction "retenue d'alluvions" devient ici principale. L'intérêt du stockage d'alluvions est lié soit à l'objectif protection d'une retenue contre l'envasement", soit à l'objectif "amélioration des ressources en eau par étalement des crues et par développement de nappes souterraines dans les matériaux alluvionnaires retenus".

Les principes généraux de l'aménagement des grosses ravines sont les suivants :

- a) Les barrages doivent avoir une grande durée de vie puisque la végétation ne pourra pas venir prendre immédiatement le relais. Ce seront des ouvrages en dur : en gabions mais surtout en maçonnerie de grosses pierres au mortier de ciment.
- b) La végétation joue un rôle important même si les barrages sont ici la partie centrale de l'aménagement. La végétalisation des atterrissements, sauf dans la partie centrale du canal laissée libre pour faciliter l'écoulement des crues :
 - consolide les atterrissements, leur donne une pente plus forte, ce qui se traduit par un volume d'alluvions stockés supérieur ;
 - canalise et recentre les écoulements et évite ainsi les sapements de berges et le contournement des ouvrages ;
 - suivant le choix des espèces utilisées produit du bois, du fourrage ou des fruits dans un milieu par ailleurs peu propice aux cultures annuelles compte tenu de la torrencialité.
- c) Les ouvrages doivent s'appuyer les uns sur les autres, l'écartement étant calculé en tenant compte de la **pente de compensation**, c'est à dire de la pente observée au fond des ravines sur le terrain où l'on ne constate ni arrachement, ni sédimentation. Le principe de la correction en escalier doit être respecté si l'on veut assurer la pérennité de l'aménagement. Un écartement trop important ou la destruction d'un ouvrage compromet à terme la stabilité de tous les ouvrages supérieurs. En effet l'érosion régressive est particulièrement

rapide lorsqu'une masse d'alluvions tapisse le lit de la ravine. Même lorsque cette érosion est moins rapide parce qu'elle doit inciser la roche en place, nous sommes obligés de raisonner sur des durées longues, compte tenu de la pérennité des ouvrages qui est recherchée.

Lorsque l'écartement entre les ouvrages est trop important, la base d'un barrage est afouillée, le coût de l'opération est élevé (reprise de la maçonnerie en sous-oeuvre, construction d'un contre-barrage). Il est donc économiquement plus rentable de déterminer l'écartement entre les ouvrages de telle façon que le risque d'afouillement soit minimisé.

Lorsque l'objectif est de stabiliser le profil il faut traiter les sections où l'incision joue réellement un rôle. Dans ce cas, il suffit souvent d'installer des ouvrages de taille modeste pour cesser cette incision. Lorsque l'objectif est de stocker des sédiments, on intervient généralement plus à l'aval dans des sections à pentes faibles, ce qui permet de retenir un volume d'alluvions plus important pour une même hauteur d'ouvrage. Cet objectif conduit à donner une hauteur plus importante aux ouvrages.

Les travaux de correction torrentielle décrits constituent une technologie à la fois coûteuse et fragile. Le coût est lié à l'emploi de matériaux susceptibles de durer (gabion et maçonnerie) et à la nécessité de dimensionner largement les ouvrages pour leur permettre de résister aux diverses contraintes et risques (chocs de gros blocs, cisaillement par des berges instables, renversement sous la pression de l'eau, afouillement, renardage, contournement, etc...).

La fragilité provient de ce que la destruction d'un ouvrage provoque souvent la ruine des ouvrages situés en amont sous l'effet de l'érosion régressive. L'écêtement d'une grosse ravine n'est justifié que dans le cas où cette ravine menace des enjeux ayant une grande importance économique, là où un service chargé d'assurer l'entretien des ouvrages existe et dispose de moyens financiers importants et d'un personnel qualifié.

5.4.5. Traitement des ravines moyennes par génie mécanique et biologique (voir Lilin et Koohafkan, 1987).

"Lorsque les petites ravines se sont dégradées suffisamment pour qu'il ne soit plus possible d'installer directement des barrages biologiques mais que le stade de ravinement torrentiel n'est pas encore atteint, il faut alors utiliser successivement des seuils pour fixer les fonds et ensuite une intervention biologique.

Vous trouverez l'ensemble des principes nécessaires pour l'aménagement des ravines moyennes sur la page "les dix commandements pour la fixation des ravines". Les seuils à construire n'ayant pas une durée de vie indéfinie il peut être économique de remplacer les seuils en pierres sèches souvent difficiles à trouver par des seuils en gabion encore trop chers, par des seuils en grillage de fer dont le coût est généralement trois fois plus faible que les premiers. C'est ensuite à l'utilisation de la végétation que l'on doit la stabilisation finale de ces ravines. Il s'agit d'une part de fixer les sédiments dès qu'ils se sont déposés grâce à des herbes à rhizomes qui suivent progressivement l'élévation des sédiments. L'usage de lignes continues serrées d'arbustes en bordure de la ravine permet de recentrer les écoulements. Par ailleurs, dès qu'un volume suffisant de terre est rassemblé, on peut planter en bordure des lèvres de la ravine, des grands arbres produisant du fourrage, des fruits ou du bois noble qui vont stabiliser les bords de ravine. Sur les flancs de celles-ci il sera souhaitable de rechercher les espèces les mieux adaptées et les plus productives. Enfin en bordure de ravine il est souhaitable d'installer une ligne d'arbres servant de base à l'isolation de ce milieu qui reste toujours fragile.

Dans le cas de ces ravines petites et moyennes il est possible de développer une exploitation végétale intéressant les paysans. Ceux-ci pourront donc être formés en vue de maintenir l'ensemble du système de fixation de correction de ces ravines et profiter par la même occasion de la production de fourrage, de fruits et de bois qu'il est possible de sortir à partir du moment où l'on dispose d'une masse de sédiments suffisamment importante.

En Algérie la durée de vie des barrages étant extrêmement réduite, de l'ordre de deux à dix ans pour les petits barrages collinaires et de vingt à cinquante ans pour les grands barrages, une action de restauration des terrains de montagne et de correction des ravines a été développée. Celle-ci a pour rôle général d'arrêter l'érosion, c'est à dire de bloquer les ravines là où elles creusent. On installe des seuils dans des goulots d'étranglement profonds et étroits et l'on forme des seuils élevés que l'on peut surélever jusqu'à obtenir une pente d'équilibre du fond et des berges ; il s'agit donc de gérer les sédiments. Mais comme l'aménagement d'une ravine moyenne d'un kilomètre vaut de l'ordre de un million de francs français et qu'il existe des dizaines de milliers de ravines à aménager, des études actuellement sont en cours d'une part pour réduire le coût de ces aménagements et d'autre part pour chercher à valoriser ces aménagement de ravines (Roose, 1989 ; Bourougaa et Monjengue, 1989).

Actuellement des gabions sont installés au débouché des ravines secondaires dans les ravines principales mais des seuils en grillage léger permettent de fixer l'ensemble de ces ravines secondaires.

(prévoir des illustrations de différents types de seuils, de leur coûts ainsi que les tests de végétaux utilisés pour fixer les berges et les hauts de pente en Algérie. Les résultats de Bourougaa et Samson).

En conclusion, insister sur le coût de la correction torrentielle très élevé qui n'est justifiée que s'il existe en aval des barrages ou des ouvrages importants à protéger. Prévenir vaut mieux que guérir, d'où l'intérêt de réduire le ruissellement et l'érosion dès qu'elle se forme, c'est à dire sur les versants. Proposer sur des planches un certain nombre de micro barrages perméables faciles à construire et peu coûteux.

ANNEXE

DIX COMMANDEMENTS POUR L'AMENAGEMENT DES RAVINES

1. Tant qu'on n'a pas amélioré l'infiltration sur le bassin versant, il ne faut pas tenter de reboucher la ravine (sinon elle trouvera un autre lit), mais prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale (au minimum).

2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 1 à 6 ans, mais il doit concerner tout le bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils ; si on inverse l'ordre, les plantes sont emportées avec les terres lors des crues.

3. L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides.

Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluent de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.

4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine) qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps on peut doubler cet écartement et construire les seuils intermédiaires dès que la première génération de seuil est comblée de sédiments : stabiliser immédiatement les sédiments piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants.

5. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il vaut mieux drainer les seuils (grillage, chicanes ou pierres libres).

6. Les seuils doivent être ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements. Au contact entre le sol limono-argileux et les pierres des seuils, il faut prévoir une couche filtrante de sable et de gravier pour éviter que les sous-pressions n'entraînent les particules fines et la formation de renards.

7. Le courant d'eau doit être bien centré dans l'axe de la ravine par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates \pm cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force de cisaillement des sables, galets et roches qui dévalent à vive allure au fond des ravines.

8. L'énergie de chute de l'eau qui saute du déversoir doit être amortie par une bavette (enrochement, petit gabion, grillage + touffes d'herbes) ou par un contre-barrage (cuvette d'eau) pour éviter les renards sous le seuil ou le basculement du seuil.

9. Tenir le bétail à l'écart de l'aménagement : il aurait vite fait de détruire les seuils et de dégrader la végétation. En compensation, on peut permettre des prélèvements de fruits, de fourrages et plus tard de bois, en échange de l'entretien de l'aménagement.

10. L'aménagement mécanique n'est terminé que quand on a éteint les sources de sédiments, stabilisé les têtes de ravine et les versants. La végétalisation doit alors se faire naturellement si on a atteint la pente d'équilibre, mais on peut aider la nature en couvrant rapidement les sédiments (herbe) et en les fixant à l'aide d'arbres choisis pour leurs aptitudes écologiques et leur production. Il faut passer de la simple gestion des sédiments à la valorisation des aménagements.

6 - L'ÉROSION EN MASSE

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique.

6.1 - LES FORMES D'ÉROSION EN MASSE

Les phénomènes de solifluxion sont très nombreux mais on peut les regrouper en quatre groupes principaux :

a) Les glissements lents ou le creeping

C'est un glissement plus ou moins rapide des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observent assez généralement sur les pentes fortes par la forme couchée des jeunes plants forestiers qui se redressent en formant une crosse à la base des arbres adultes. Dans les zones sylvopastorales, la circulation des animaux le long des versants peut également entraîner la formation d'escaliers encadrés par des réseaux de fissures (voir Moeyersons, 1989).

Une autre forme de creeping causée par les techniques culturales utilisées par l'homme a été traitée à part : c'est l'érosion mécanique sèche. L'ensemble de ces processus aboutit, comme l'érosion en nappes et rigoles, au décapage des sommets de collines et à l'empâtement des bas de pentes.

b) Les glissements rapides

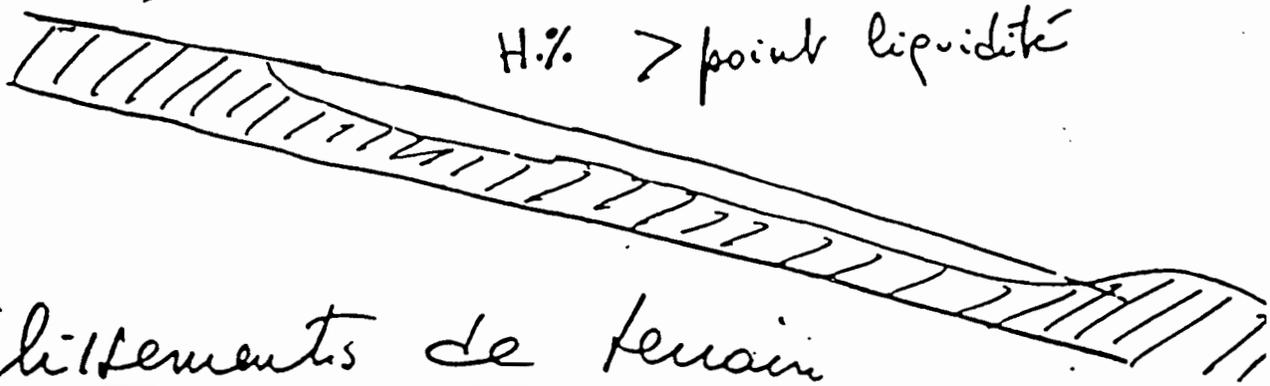
Les glissements de terrain en planches sont un décollement d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact, servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie.

c) Les versants en bourrelets

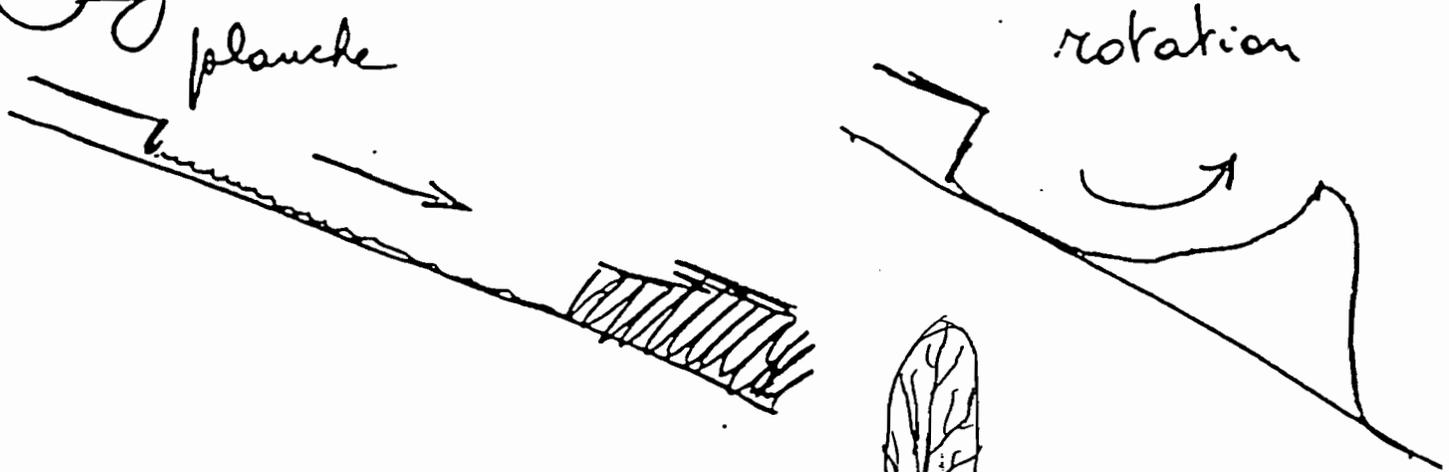
ou boursoufflés qui sont des formes molles apparaissant dans des conditions humides où les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact que représente l'altérite des marnes ou des argilites par exemple.

FIG. 4.61 - DIFFERENTES FORMES D'EROSION EN MASSE

① Coulées boueuses



② Glissements de terrain

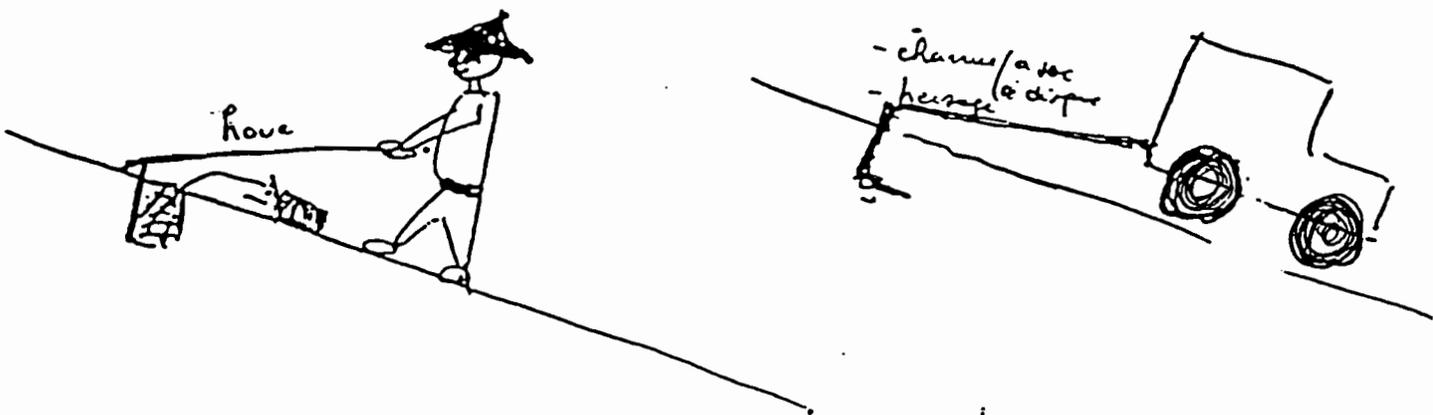


③ Creeping



④ Erosion mécanique (ou érosion sèche)

= descente progressive des terres poussées par les outils de travail de sol



d) Les coulées boueuses

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène. Mais les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux de taille très hétérogène.

e) Les glissement rotationnels ou coups de cuillère

Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contrepenne sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage l'allure d'un moutonnement. Au creux du coup de cuillère, on observe souvent une zone humide avec une végétation adaptée à l'hydromorphie. Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepenne et ce ravinement va finir par faire disparaître la contrepenne, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement.

f) Les formes locales

Il s'agit d'effondrement de berges, de sapement de berges ou de sapement de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine, entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et fait progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'il se forme un méandre.

6.2 - LES CAUSES ET LES PROCESSUS DES MOUVEMENTS DE MASSE

La cause des mouvements de masse est à rechercher dans un déséquilibre entre le poids de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve et des végétaux qui la couvrent, entre cette masse et le coefficient de frottement de ces matériaux, soit pour un plan de glissement suite à une humectation de ce plan, soit par dépassement dans le matériau du point d'élasticité ou de liquidité. Dans l'ensemble du matériau qui se déplace, il n'y a sélectivité ni lors de l'érosion ni lors des dépôts. Les principales causes en relation avec ce déséquilibre sont les secousses sismiques, les variations de la masse volumique, l'alternance gel et dégel, l'humectation du matériau, l'altération du matériau,

la modification de la géométrie externe du versant (par exemple par terrassement, creusement d'un talus pour une route, érosion au pied d'une terrasse par la rivière, surcharge du versant par des grands arbres ou par un talus, augmentation de la pression interstitielle de l'eau au sein de la masse et modification des écoulements naturels ou artificiels). (Voir thèse Desvarreux, 1970 : recherche d'une méthode d'étude des mouvements de terrain et applications pratiques.) Voir aussi article : Jean Michel Avenard, 1989 : Cahiers ORSTOM-Pédologie.

6.3 - LES FACTEURS DES RISQUES DE GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les facteurs de résistance au glissement d'une couverture pédologique, apparaissent dans l'équation de Coulomb :

$$S = C + (P - U) \text{ tangente } F$$

où S représente la résistance au cisaillement,

C la cohésion du sol,

P la pression normale à la surface du mouvement due à la gravité,

U la pression d'eau interstitielle dans le sol,

F l'angle de frottement interne,

tangente de F, le coefficient de frottement. (Fery, 1987).

Les glissements se produisent lorsque la contrainte de cisaillement dépasse la résistance du sol ou lorsque la limite de plasticité ou de liquidité est atteinte. Le creeping est souvent présent lorsque la couverture pédologique est épaisse, la pente forte et le climat très humide. Les glissements de terrain en planche dépendent souvent de la présence de gneiss ou de schistes ou encore de cendres volcaniques projetées sur les schistes ou les granits et un pendage dans le sens de la pente, lorsque la couverture pédologique n'est pas très profonde, sur des fortes pentes ou encore lorsqu'il existe un niveau imperméable en forte pente.

Les versants en bourrelets ou boursoufflés, sont généralement liés à des milieux humides et marneux, de même que les glissements de terrain rotationnels. Les sapements de berges ou de têtes de ravines ou de flancs de ravines, sont généralement liés à la présence d'écoulements qui creusent sous la couverture pédologique jusqu'à l'éboulement du matériel. On peut arriver également à des processus d'effondrement de tunnels provenant de la dissolution de gypse ou de sel ou creusés par des trous de rats ou des rongeurs à l'intérieur de la couverture pédologique dans lesquels les eaux vont

s'engouffrer et finalement creuser le matériau jusqu'à effondrement du tunnel. Les sapements de berges sont fréquents dans les courbures des rivières et lors de la formation de méandres.

6.4 - LA LUTTE CONTRE LES MOUVEMENTS DE MASSE

Les méthodes de lutte contre les mouvements de masse sont généralement très coûteuses et compliquées. Il s'agit bien souvent d'éviter que les eaux de pluie ne s'infiltrant dans le sol, n'alourdissent la couverture pédologique et n'atteignent rapidement le plan de glissement. Pour ce faire, on tente de drainer la surface du sol pour écarter le ruissellement vers des zones non dangereuses, généralement les zones convexes, et on peut drainer en profondeur la zone située au niveau du plan de glissement pour éviter que la pression intersticielle ne décolle la couverture pédologique de la zone stable située en-dessous du plan de glissement.

Une autre méthode consiste à assécher le terrain en augmentant l'évapotranspiration des plantes ; il s'agit le plus souvent de planter des eucalyptus ou d'autres plantes qui ont un pouvoir évaporant important. Il faut cependant éviter que ce végétal n'atteigne des poids considérables. Il faut donc maintenir à la fois des arbustes sur le bord des champs et d'autre part, si l'on a introduit des plantations arborées, il faut les gérer en taillis, c'est-à-dire garder le matériel végétal très jeune dans un état où il évapotranspire beaucoup et produit le maximum de biomasse. Il ne faut pas admettre des arbres de très haute taille sur des versants où les risques de glissement sont élevés. Lorsque le plan de glissement est situé proche de la surface du sol, on peut admettre que les racines exercent une forte résistance mécanique au cisaillement de la couverture pédologique. Par contre, si la surface de glissement potentiel est trop profonde et hors de portée des racines, cette résistance des racines ne joue plus et on peut même penser que la surcharge des versants par la masse boisée risque de faciliter le glissement. De plus, les vents, en transmettant des vibrations au sol par les arbres, joueraient un rôle néfaste qui risque de former des fissurations du sol et donc de favoriser localement l'infiltration des eaux ruisselantes jusque sur le plan de glissement. Il faudrait favoriser des essences à croissance rapide et à enracinement pivotant et éviter les coupes à blanc qui détruisent toute l'armature de racines dans la couverture pédologique au même moment. Le boisement pourrait agir non seulement par l'action mécanique de son enracinement qui augmente la résistance au cisaillement, mais aussi en modifiant la teneur en eau du sol. En effet, une forêt a une très forte évapotranspiration qui réduit donc la pression intersticielle de l'eau dans la couverture pédologique. En effet, dès que l'on effectue une coupe à blanc, on constate dans la parcelle l'augmentation de l'humidité du sol largement

supérieure au-dessus d'une parcelle voisine restant boisée. Dans les pays tempérés, on pourra aussi choisir d'installer un taillis de feuillus plutôt qu'une fûtaie résineuse. En effet, le taillis a l'avantage de conserver toujours un système racinaire vivant et, à l'époque où les pluies sont abondantes et l'évapotranspiration faible (printemps et automne), favorise une meilleure évaporation directe du sol.

Lorsqu'on est obligé de creuser le versant (réseau routier), il faut remodeler le talus en augmentant la butée du talus par un masque (enrochement ou mur de soutènement en gabion) qui améliore le drainage du versant. La butée du pied s'opposera au couple de rotation du glissement. Un fossé, à l'amont des routes pourra intercepter les eaux de ruissellement pour les empêcher de s'infiltrer dans les fissures de traction de la tête. Les drains, placés dans la zone menacée, réduiront la pression hydrostatique.

Au cas où l'on observe des fissures à la surface du sol, par exemple entre les terrassettes formées par la circulation du bétail, le travail de la surface du sol peut aider les eaux d'infiltration à se répartir sur l'ensemble de la couverture pédologique et par conséquent, retardent l'avancement du front d'humectation vers le flanc de glissement et améliorent l'évaporation de la masse d'eau (voir les travaux de Moeyersons au Rwanda). Lorsqu'on fixe une route sur un versant pentu, il est utile tout d'abord de stabiliser l'assiette de la route par la plantation d'eucalyptus que l'on maintient en taillis vers l'aval et vers l'amont ; d'y installer de l'herbe qu'il ne faut surtout pas arracher ; on peut installer vers l'amont un mur drainé dont les fondations sont bien ancrées dans la roche et finalement en montagne, s'il existe un versant très pentu, il est possible de jeter un filet en grillage de fil de fer pour amortir la chute des pierres.

6.5 - LA MESURE DES RISQUES DE MOUVEMENTS EN MASSE

Il existe toute une série de méthodes susceptibles de montrer la progression différentielle des couches superficielles du sol par rapport aux couches profonds qui restent stables. Citons le trou de sonde rempli de matériaux colorés, éventuellement souples, de la même densité que la couverture pédologique (par exemple, du sable d'une couleur différente du matériau, des tessons de bouteilles ou des bouts de tuyau de jardin en plastique remplis du sol en place). On peut aussi prendre un caillou que l'on pile en petits graviers de 1 cm et que l'on tasse dans le trou de sonde. Il est nécessaire d'ouvrir une fosse et d'observer ces différents matériaux mis en place tous les deux ans pour observer un déplacement variable dans l'espace de ces matériaux.

On peut poser dans un trou de carrière des sondes, des piquets souples dépassant la surface dont on peut mesurer l'inclinaison et l'angle depuis la surface sans être obligé de détruire le dispositif. Enfin, on peut également ouvrir des fosses et planter latéralement dans la face qui représente la plus grande pente, des clous et des plaquettes en lignes descendant jusque dans le matériau stable. Là également, il faudra ouvrir la fosse régulièrement tous les deux ans pour constater les mouvements de masse et établir les vitesses de chacun d'eux.

Il est possible, à partir des tests de points de liquidité, points de plasticité et de la mesure de la résistance au cisaillement ainsi que de l'observation de l'état hydrique du sol au cours du temps, de prévoir les risques de glissement de terrain lors des années plus ou moins humides.

En conclusion, certains spécialistes commencent à bien connaître les processus et les causes de l'érosion en masse ainsi que certaines méthodes permettant de réduire les risques d'érosion en masse. Il s'agit bien souvent de drainer les matériaux et de réduire l'infiltration des eaux de pluies dans la couverture pédologique. Certaines méthodes de lutte contre l'érosion en masse consistant bien souvent à réduire l'humidité du terrain et à augmenter sa résistance au cisaillement, il se fait que des méthodes de lutte contre l'érosion en nappe, consistent au contraire à augmenter l'infiltration par le terrassement et ont ainsi participé à l'augmentation des risques de glissement de terrain. Il est clair que toute formation de fossé sur un versant en grande pente risque de déstabiliser ce versant d'une part en raccourcissant le chemin de l'eau jusqu'à l'altérite et au plan de glissement et d'autre part, en déséquilibrant le talus et les forces de cisaillement. Il est donc important de bien considérer les risques des différents processus d'érosion avant de décider d'une méthodologie de lutte antiérosive.

7 - L'EROSION EOLIENNE

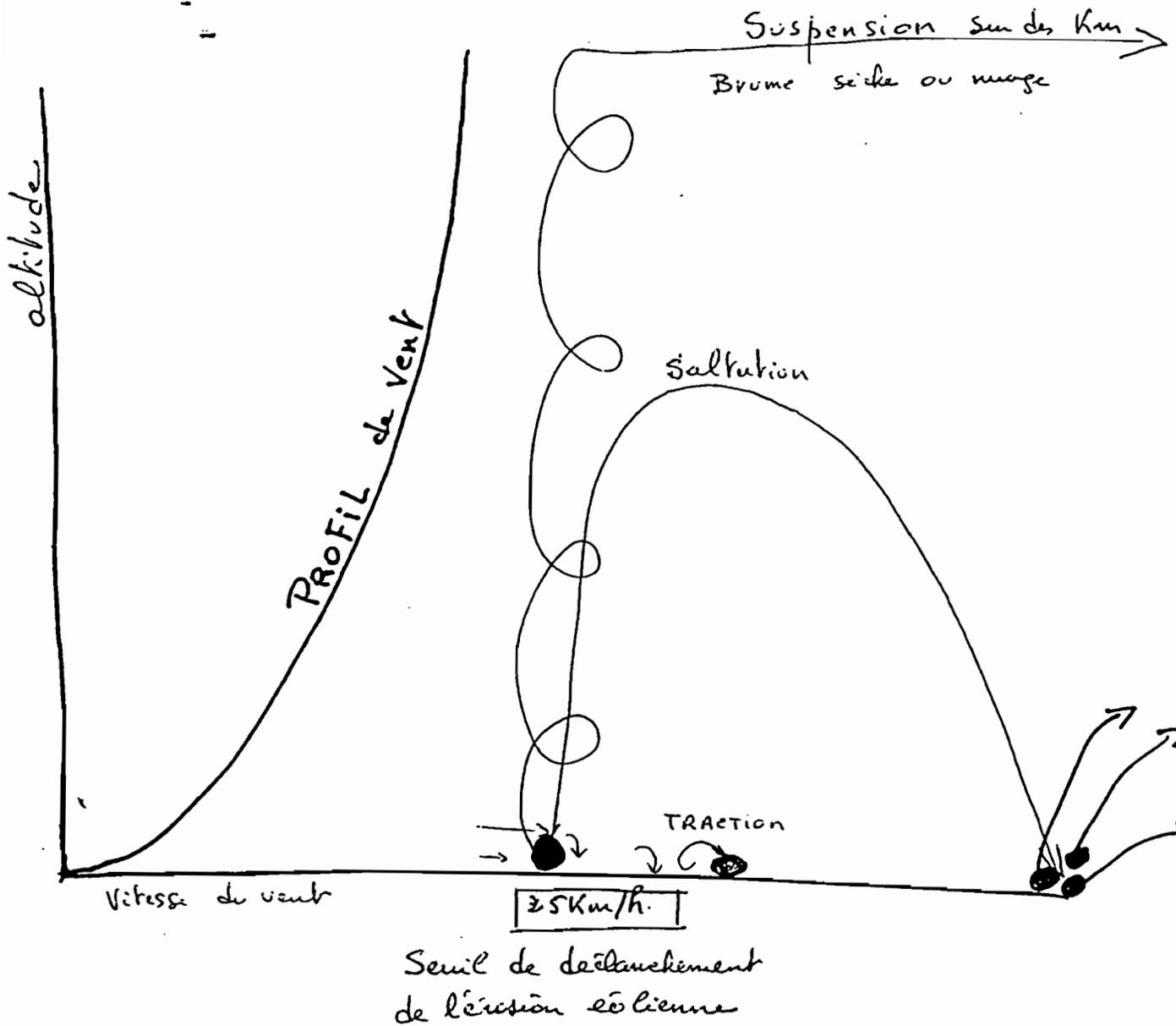
L'érosion éolienne prend de l'importance en Afrique de l'Ouest, dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux secs.

7.1 - LES PROCESSUS ET LES FORMES

Lorsque la vitesse du vent dépasse 25 km/h ou 7 m/s on peut observer les trois processus suivants :

- Tout d'abord, la **déflation** entraînant le départ, en **suspensions fines**, des particules les plus légères du sol. Ces particules sont aspirées par un tourbillon d'air jusqu'à plusieurs kilomètres d'altitude et sont ensuite dispersées sous forme de brumes sèches. Elles peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres. Par exemple on retrouve des dépôts de poussière provenant du désert à raison de quatre fois par an à Montpellier et encore une à deux fois par an à Paris.
- Le deuxième processus est la **saltation** : il s'agit de nappes de sable soulevées par des vents violents qui vont circuler sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres et laisser au sol des nappes de sable ridées que l'on peut appeler "ripplemarks". Ces nappes de sable peuvent développer des buttes lorsqu'elles sont piégées dans les touffes de végétation. Pour mettre en mouvement les grains de sable, le vent doit développer une vitesse minimum qui provoque un déséquilibre des grains, les aspire vers le haut et les projette à une certaine distance. Ces grains, retombant au sol, transmettent leur énergie cinétique aux grains restés sur la terre qui à leur tour et par réaction en chaîne vont être aspirés à une certaine altitude. Ce sont ces nappes de sable qui flagellent le bas des rochers dans les zones désertiques et leur donnent une forme typique de champignons et qui dégradent la végétation.
- Le troisième processus, développé par l'érosion éolienne, est la traction des sables. Lorsque les sables sont trop grossiers, ils ne peuvent être aspirés en altitude ; ils sont tout de même déséquilibrés par les vents courants à la surface du sol qui leur donnent un mouvement de rotation et leur permettent de grimper en haut des dunes et de provoquer l'avancement général des

FIG. 4.62 - TROIS PROCESSUS D'EROSION EOLIENNE : suspension, saltation, traction



- sol sec, peu cohérent -

- 1 - Suspension : nuage de limons impalpable (ex. poussières en S. sèche circulation jusqu'à 10 km d'altitude - centaines de km de distance
- 2 - Saltation : grains de sable fin 100 microns
gros dégâts : dunes mouvantes - dégâts aux végétaux
- 3 - Traction à la surface du sol sables grossiers roulant à la surface des dunes, voiles de sable

dunes. C'est ainsi que les barcanes ont une forme semicirculaire. La partie au vent est en pente douce tandis que la partie intérieure du cercle est en pente raide. Les grains de sable sont poussés vers la pente douce et tombent ensuite à l'intérieur de la partie circulaire. Il existe aussi des formes en creux laissées par l'érosion éolienne qui sont des sortes de couloirs où le vent s'engouffre entre deux dunes et creuse ce que l'on appelle des "yardang". Les nappes de sable ainsi déplacées entre les dunes vont être piégées par des touffes de végétaux qui vont petit à petit former ce que l'on appelle des "nebkas" qui en s'agglutinant vont finalement former des dunes de plus en plus grosses.

L'origine des matériaux provient souvent des matériaux détachés préalablement par l'érosion hydrique. Ce sont des sédiments continentaux ou marins, des produits d'altération ou de désagrégation des roches grenues ou alors des matériaux des sols pulvérisés finement par des techniques de préparation du sol, en particulier par l'usage abusif de charrues à disques, en particulier sur des sols volcaniques (ex. : les Andes ... du Nicaragua ou encore les limons dans la Grande Plaine américaine).

Il est bon de souligner le parallélisme entre les processus d'érosion éolienne et les formes des facteurs de l'érosion en nappe hydrique.

7.1 - LES EFFETS DE L'EROSION EOLIENNE

- a) Le premier effet est le vannage des particules légères ou fines. L'érosion éolienne est très sélective. Elle enlève à grande distance les particules les plus fines, en particulier les matières organiques, les argiles et les limons qu'elle peut déposer à des kilomètres de distance. C'est ainsi que ce sont formés les loess autour des zones désertiques glaciaires de l'Europe et du Nord des Etats-Unis.
- b) Les formes les plus spectaculaires sont l'accumulation de sables plus ou moins stériles et la migration des dunes.
- c) La dégradation des croûtes de sédimentation à la surface des sols dénudés ou encore la désagrégation des roches,, à leur base au niveau de leur contact avec le sol.

- d) L'ensemble des nappes de sable qui circulent à faible altitude peuvent dégrader les végétaux (en particulier les jeunes semis de mil ou de coton dans les zones semi-arides d'Afrique). Finalement, les effets de l'érosion éolienne entraînent un dessèchement du milieu par perte de capacité de stockage des nutriments et de l'eau des terres qui ont subi cette érosion éolienne.

7.2 - LES FACTEURS MODIFIANT L'IMPORTANCE DE L'ÉROSION ÉOLIENNE

a) L'aridité du climat

Bien que l'érosion éolienne puisse avoir lieu également dans des climats humides mais où certains mois de l'année sont particulièrement secs, à condition que le sol soit préparé par des techniques culturales qui pulvérisent la surface du sol, on constate en Afrique que l'érosion éolienne ne se manifeste avec une certaine importance que là où les pluies sont inférieures à 600 mm, où l'on observe plus de six mois secs, où l'évapotranspiration potentielle dépasse 2.000 mm, où les sols sont dénudés et la végétation passe d'une savane à une steppe à plage de sol dénudé.

Il faut aussi que la vitesse du vent dépasse certains seuils de l'ordre de 25 km/h ou de 7 m/s. Mais les phénomènes d'érosion éolienne seront d'autant plus importants qu'il existe des vents forts et réguliers ou des bourrasques prenant des directions dominantes.

- b) Les sols les plus fragiles sont limonosableux, donc riches en particules comprises entre 10 et 100 microns. Les sols qui sont plus argileux sont nettement plus cohérents et mieux structurés, donc plus résistants. Les sols à sable grossier et à gravier ou à lourde charge en roche, sont trop difficiles, les particules sont trop lourdes pour être déplacées par l'érosion éolienne. L'optimum pour l'érosion éolienne, se situe autour de 80 microns.
- c) L'agrégation des sols. Moins les sols comportent en surface de matières organiques, de fer et d'alumine libre, de calcaire qui améliorent la structure, l'organisation des particules, et plus ces sols seront fragiles. Par contre, la présence de sodium ou de sel à la surface du sol, entraîne souvent la formation de pulvérulence qui favorise l'érosion éolienne. -

d) **L'état de la surface des sols**

"La pierrosité à la surface du sol, en formant un "mulch", réduit les risques d'érosion éolienne. C'est le cas dans les regs.

La rugosité du sol laissée par le travail motteux ou par des billons perpendiculaires au vent dominant, ralentit la vitesse du vent au ras du sol et diminue les processus de saltation.

- e) La végétation, elle aussi, réduit la vitesse du vent au ras du sol. De même, les résidus de culture que l'on peut laisser fichés dans le sol sous forme de chaume sur pied, vont réduire la vitesse du vent. Enfin, l'humidité du sol augmente la cohésion des sables et des limons, rendant ceux-ci indisponibles pour l'érosion éolienne.

7.3 - LA LUTTE CONTRE L'EROSION EOLIENNE

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux ; d'abord réduire la vitesse du vent à la surface du sol et augmenter la cohésion du matériau face à cette agression.

a) Augmenter la cohésion du matériau

L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure.

La pulvérisation de déchets pétroliers, d'huile lourde ou de bitume et de déchets de l'industrie plastique (genre de colle diluée) permet d'agglomérer les particules à la surface du sol et donc de les rendre difficilement transportables par le vent (voir les réalisations de l'Université de Gand).

L'irrigation d'appoint peut être une méthode élégante pour réduire les problèmes d'érosion. Il suffit en effet, d'irriguer le sol avant la saison des pluies normales pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les tornades qui, généralement, causent des dégâts au début de la saison des pluies.

b) Augmenter la rugosité de la surface du sol

Il s'agit de techniques culturales laissant à la surface du sol de grosses mottes ou des billons perpendiculaires à la direction dominante des vents. Ces billons ne doivent pas dépasser 40 cm de haut, sans quoi le vent décoiffe le sommet des billons et accélère l'érosion.

Une autre méthode très efficace consiste à laisser les résidus de cultures sur le champ et, en particulier pour lutter contre l'érosion éolienne, à laisser des chaumes sur pied. On constate, par exemple, au Burkina Faso, que les tiges de mil et de sorgho, lorsqu'elles sont coupées à 50 cm ou 1 m et sont laissées verticales à la surface du sol, piègent quantités de poussières mais également les feuilles d'arbres qui sont soufflées par les vents à l'époque des tornades.

c) On peut également augmenter le couvert végétal

On peut également réduire la vitesse du vent en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride, aussi est-il particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de façon à augmenter la rugosité du terrain, à protéger la surface du sol plus qu'à être enfouis où ils ne pourront améliorer que légèrement la structure et la résistance à l'agression du vent. Dans les conditions tropicales semi arides de l'Afrique de l'Ouest, les grands parcs naturels d'*Acacia albida* qui recouvrent les zones cultivées protègent généralement assez bien ces zones fragiles contre l'érosion éolienne en réduisant la vitesse du vent au ras du sol mais aussi en déposant à la surface de celles-ci quantité de feuilles. Malheureusement, la plupart de ces parcs sont composés d'arbres très âgés et il faudra rapidement tenter de régénérer ces parcs qui contiennent 25 à 40 arbres adultes par hectare. La plantation de 100 à 150 jeunes arbres le long des lignes de défense contre l'érosion hydrique, devrait permettre d'obtenir une bonne densité d'arbres adultes. Dans les zones soumises à des vents violents mais de direction régulière, l'installation de haies vives et de brise-vents sont des méthodes bien connues. Ces barrages perméables au vent permettent de protéger une distance égale à vingt fois la hauteur de l'obstacle. Ainsi, l'ICRISAT au Niger, a constaté le piégeage de quantités énormes de sable dans les bandes d'Andropogones qui entouraient ces essais au champ et propose aux paysans d'entourer leurs champs d'une double ligne d'Andropogon. Ailleurs, des cultures basses d'arachide et de coton sont protégées et associées par l'association à des lignes de mil et de sorgho qui peuvent atteindre 4 m de haut. Enfin, les brise-vents dont l'objectif initial est de réduire l'évaporation due au vent, servent également à réduire les transports solides de ce vent. Ils doivent être perméables au vent pour éviter de créer des tourbillons et associer des espèces dont la forme et l'altitude sont complémentaires et en nombre suffisant pour pouvoir être exploités successivement et rajeunis régulièrement.-

fragiles contre l'érosion éolienne en réduisant la vitesse du vent au ras du sol mais aussi en déposant à la surface de celles-ci quantité de feuilles. Malheureusement, la plupart de ces parcs sont composés de 25 à 40 arbres très âgés et il faudra rapidement tenter de les régénérer. La plantation de 100 à 150 jeunes arbres le long des lignes de défense contre l'érosion hydrique, devrait permettre d'obtenir une bonne densité d'arbres adultes. Dans les zones soumises à des vents violents mais de direction régulière, l'installation de haies vives et de brise-vent sont des méthodes bien connues.

Les brise-vent

Leur rôle est double : ralentir la vitesse du vent pour réduire l'évaporation et l'érosion éolienne.

Leur action - réduire de 20 % la vitesse du vent - s'étend sur dix à douze fois la hauteur du brise-vent en aval et en amont.

Cette protection dépend de la perméabilité du brise-vent. Une faible perméabilité provoque une plus grande réduction de vitesse, mais sur une largeur protégée plus faible. D'après Heusch (1988), si on réduit trop la vitesse (B.V. trop dense), la température s'élève et les plantes grillent le long du brise-vent. Il vaudrait mieux reconstituer un parc d'une quarantaine d'arbres adultes pour freiner plus régulièrement la vitesse du vent.

En principe, les brise-vent diminuent l'évapotranspiration jusqu'à 20 % : toutefois, cet effet favorable peut être contrebalancé par la consommation d'eau du brise-vent lui-même, d'où l'intérêt des brise-vents autour des cultures irriguées. Au Niger dans la Vallée de Keita, on observe une amélioration sensible des rendements (+ 27 %) sauf à proximité du brise-vent où le mil souffre de la concurrence racinaire du brise-vent (ombrage et concurrence hydrique).

La disposition optimale comporterait deux rangs d'arbres élevés, entourés de deux rangs d'arbres bas, soit une bande de dix mètres (figure 8.2 b) exploitée alternativement. La zone cultivée entre les brise-vents peut s'étendre sur cent mètres si les grands arbres dépassent cinq mètres de haut. Pour réduire la concurrence racinaire, on brise les jeunes racines horizontales des arbres dès la première année en repassant dans la raie de labour. Il est particulièrement recommandé de regarnir les brèches dans la haie, sans quoi le vent s'y engouffre (effet Venturi) et réduit considérablement l'efficacité du brise-vent.

Lorsqu'on exploite les arbres, il est recommandé de laisser deux mètres de haie pour que les jeunes repousses ne soient pas détruites par le bétail.

Figure 8.2 a : Influence d'un brise-vent sur le vent (Combeau, 1987)

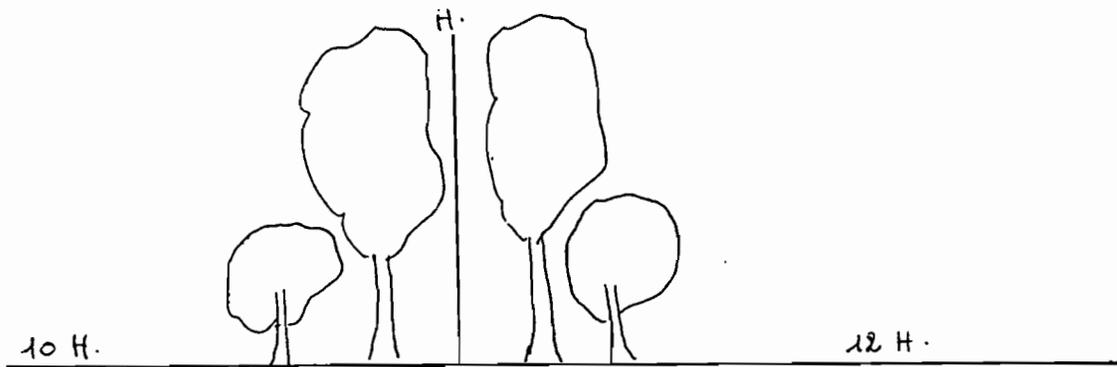
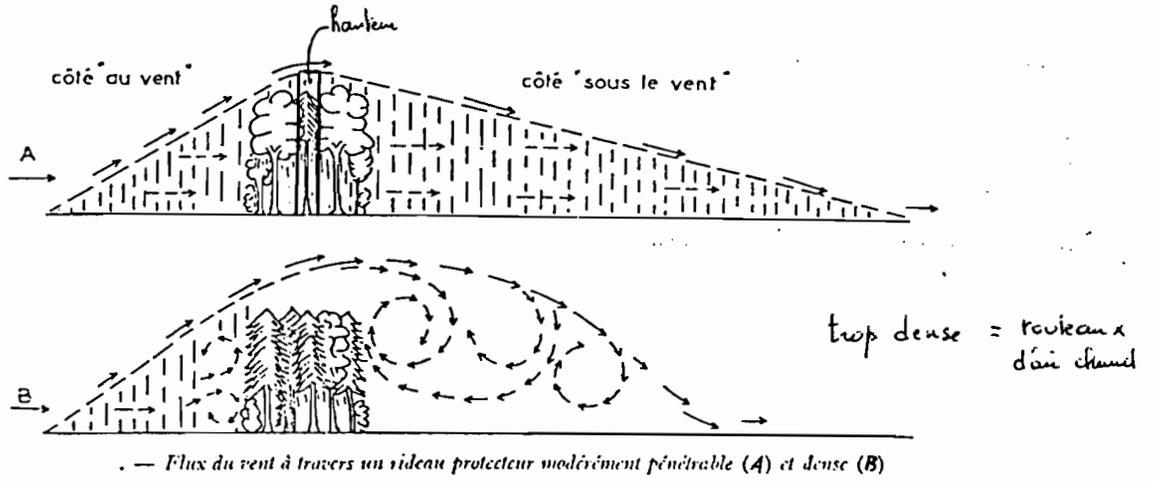
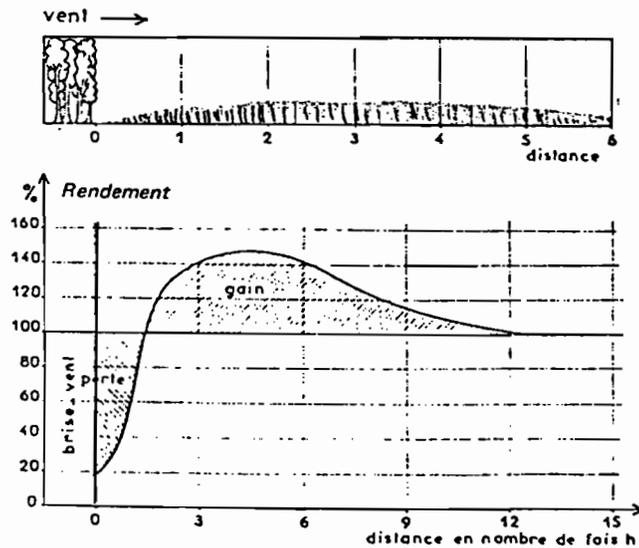


Figure 8.2 b : Influence d'un brise-vent sur la production en grain d'une céréale (Guyot, 1963)



hauteur du maïs.

gain - pertes au total 20% de gains

Les essences arborées les plus courantes en Afrique sont les eucalyptus, *Casuarina*, *neem*, divers acacia, le tamaris et le cyprès, mais ces derniers sont sujets à une maladie grave. Les roseaux et cannes de Provence peuvent aussi rendre service.

L'épaisseur d'un brise-vent a peu d'intérêt : plus elle augmente, plus la perméabilité diminue et son efficacité est réduite.

Ainsi, à dix fois la hauteur de l'obstacle, la vitesse du vent sous le vent est de 56 % de la vitesse du vent locale après une paroi de roseaux, 72 % après un brise-vent épais de 20 mètres et 83 % après une bande forestière de 600 mètres de large (extrait de Combeau, 1977).

Ainsi, Renard et Vandenbeldt (1991) au Niger, ont constaté le piégeage de quantités énormes de sable dans les bandes d'*Andropogon* qui entouraient leur essais au champ et proposent aux paysans d'entourer leurs champs d'une double ligne d'*Andropogon*. Ailleurs, des cultures basses d'arachide et de coton sont protégées par l'association de lignes de mil et de sorgho qui peuvent atteindre 4 m de haut. Enfin, les brise-vents dont l'objectif initial est de réduire l'évaporation due au vent, servent également à réduire les transports solides de ce vent. Ils doivent être perméables au vent pour éviter de créer des tourbillons et associer des espèces dont la forme et la hauteur sont complémentaires et en nombre suffisant pour pouvoir être exploités successivement et rajeunis régulièrement (figure 8.2).

8.5.4 Fixer les dunes

Il s'agit d'une part d'éteindre la source des sables et d'autre part de fixer les dunes sur place. Pour ce faire, il est fait appel à la fois à la fixation mécanique et biologique. Au cas où la direction des vents dangereux est unique, il est possible d'arrêter l'érosion éolienne par des lignes perpendiculaires à ce vent, distantes de vingt fois la hauteur de ces lignes. Si donc on utilise des tiges de mil ou de sorgho de 1 m à 1,50 m de hauteur, il faut prévoir des lignes tous les 20 m sans quoi le vent reprend les sables entre ces lignes de défense. Il est donc nécessaire d'avoir des quantités très importantes de matériaux (tiges de mil, lauriers roses qui poussent dans les oueds, palme ou résidus de la taille des forêts ou des plantations arbustives qui se trouvent dans la région) et ces transports de matériaux participent à la dégradation locale. Dans le cas fréquent où les vents dangereux soufflent de plusieurs côtés, on est amené à utiliser de la toile plastique perméable avec une maille d'environ 5 à 10 mm sur une hauteur de 50 à 80 cm et de procéder à un carroyage dont les dimensions seront d'autant plus petites que les vents sont violents. Ils peuvent varier entre 5 x 5 et 8 x 8 dans les conditions habituelles. Certaines de ces toiles plastiques sont grillées par les U.V. des rayons solaires et tombent en poudre au bout de

d) La fixation des dunes

Il s'agit d'une part d'éteindre la source des sables et d'autre part de fixer les dunes sur place. Pour ce faire, il est fait appel à la fois à la fixation mécanique et biologique. Au cas où la direction des vents dangereux est unique, il est possible d'arrêter l'érosion éolienne par des lignes perpendiculaires à ce vent, distantes de vingt fois la hauteur de ces lignes. Si donc on utilise des tiges de mil ou de sorgho de 1 m à 1,50 m d'altitude, il faut prévoir des lignes tous les 20 m sans quoi le vent reprend les sables entre ces lignes. Il est donc nécessaire d'avoir des quantités très importantes de matériaux (tiges de mil, palme ou résidus de la taille des forêts ou des plantations arbustives qui se trouvent dans la région) et ces transports de matériaux participent à la dégradation locale. D'où on en est amené à utiliser de la toile plastique perméable avec une maille d'environ 5 à 10 mm sur une hauteur de 50 à 80 cm et de procéder à un carroyage dont les dimensions seront d'autant plus étroites que les vents sont violents. Ils peuvent varier entre 5 x 5 et 8 x 8 dans les conditions habituelles. Certaines de ces toiles plastiques, vertes, sont grillées par les U.V. des rayons solaires et tombent en poudre au bout de deux ans ; il faut donc les éviter. Par contre, certains plastiques noirs résistant au U.V. peuvent être utilisés pendant deux ans sur un site et ensuite être déplacés sur un autre site. La difficulté est de les tendre et de disposer de piquets suffisamment solides (fer à béton de 12 m). Aussitôt que ce carroyage est fixé et que l'on observe une stabilité de la surface du sol, il est nécessaire de planter à l'intérieur de ces carroyages tout une série de plantes herbacées ou arbustives qui vont réformer la couverture végétale et fixer définitivement la dune (voir les listes de végétaux qui ont été sélectionnés dans différentes régions du globe).

Une autre méthode peu coûteuse et élégante consiste, en pleine saison des pluies, à semer des lignes ou des carroyages de mil ou d'autres espèces végétales qui ont une croissance rapide et qui vont assurer une fixation ultérieure des sols. La protection intégrale de ces sites contre le pâturage et les feux est évidemment indispensable pour assurer la survie déjà difficile des plantations, mais on peut prévoir une exploitation légère et surveillée de la production végétale par des troupeaux au bout de cinq ans.

En conclusion, il existe de nombreux manuels spécialisés dans le domaine de la lutte contre l'érosion éolienne ; il n'est donc pas nécessaire de développer très en détail ces techniques ici d'autant plus que de nombreuses méthodes utilisées pour la lutte contre l'érosion hydrique en nappe sont tout aussi valables pour lutter contre l'érosion éolienne dans les circonstances normales des cultures en région semi-aride.

Au bout d'un ou deux ans, ces petits barrages étant complètement sédimentés, intervient la phase de végétalisation au cours de laquelle sont installés des arbres susceptibles de produire du fourrage, des fruits et du bois de qualité en vue de valoriser ces aménagements coûteux. L'effet constaté de ces aménagements est d'augmenter la pluie limite, de retarder la crue et de l'étaler, de diminuer le volume ruisselé et surtout les débits de pointe, et donc les transports solides ainsi que la compétence et la torrencialité de ces ravines, c'est à dire la taille des blocs de pierre transportés.

TROISIEME PARTIE

ETUDE DE CAS D'AMENAGEMENTS ANTIEROSIFS

8 - DIVERSITE DES STRATEGIES DE LUTTE ANTIEROSIVE EN FONCTION DES CONDITIONS ECOLOGIQUES ET HUMAINES.

Si on effectue une transversale entre Abidjan et le désert, on constate une grande diversité des systèmes de culture traditionnelle. Dans la zone guinéenne forestière de Côte d'Ivoire, on observe de petites buttes sur lesquelles sont plantés simultanément du manioc, du maïs, des arachides, du gombo, etc...

Dans les savanes arborées soudaniennes du nord de la Côte d'Ivoire, les Senoufo ont l'habitude de remuer énormément le sol en construisant de très grosses buttes (hauteur = 80 cm) pour cultiver des tubercules (igname, manioc). Les années suivantes, ils recouvrent les résidus posés dans les sillons avec la terre des buttes pour constituer de nouveaux gros billons.

Trois cents kilomètres plus au nord, les Minianka de la région de Koutiala (Mali) réduisent la préparation du sol à un labour plus ou moins rapide, suivi de deux sarclages superficiels.

Trois cents kilomètres plus au nord, les Mossi de la région des savanes arborées soudano sahélienne de Ouahigouya sèment directement en poquets et sarclent à plat.

Enfin, dans la zone sableuse du nord du Yatenga, les Peuhls sèment directement à plat sur le sol et sarclent en construisant des buttes entre les plants pour concentrer l'eau à proximité des poquets de mil.

Cette grande diversité des techniques culturelles n'est pas le fruit du hasard, mais la résultante d'une longue adaptation de chaque ethnie à la zone écologique où elle se trouve. Plus les gens sont installés depuis longtemps en un site, plus les conditions de vie sont difficiles, et plus ils ont développé des stratégies de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols adaptées aux conditions écologiques et socio-économiques. On pourrait dire que si les paysans apparemment, n'ont guère mis au point de techniques adaptées, c'est qu'ils ont migré récemment d'un milieu où les contraintes sont fort différentes. Par exemple au Cameroun, les Capsikis paysans des monts Mandara près de Monkolo, construisent des terrasses radicales et des murettes en pierre sur les pentes fortes des versants en condition d'une forte densité de population. Lorsqu'on transporte ces populations dans la zone soudanienne peu habitée du sud-est Bénoué, au-delà de Tcholliré, ceux-ci abandonnent totalement leurs stratégies de gestion de l'eau et de la fertilité des sols.

Or réflexion faite, les techniques culturelles traditionnelles observées sont généralement fort bien adaptées aux conditions écologiques des situations. On peut s'en rendre compte en comparant le bilan hydrique. Actuellement, les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et des sols sont en pleine décadence parce qu'avec l'hygiène et les médicaments, la mortalité a baissé, ce qui entraîne une énorme poussée démographique. Les populations des zones de savane sahéenne et de montagne doublent tous les douze à vingt ans !

Ces stratégies traditionnelles ne sont plus suffisantes pour faire face aux problèmes de dégradation des sols. Cependant, elles forment une bonne base de réflexion pour mettre au point de nouvelles stratégies de gestion de l'eau et de la fertilité des sols pour lutter contre la dégradation des sols, contre le ruissellement et l'érosion qui sont étroitement liés. Il semblerait donc extrêmement sage, lorsque l'on veut effectuer des aménagements antiérosifs, d'étudier d'abord les méthodes traditionnelles de gestion des eaux avant de proposer des méthodes modernes plus adaptées aux conditions actuelles de pression démographique. On aurait probablement évité un certain nombre d'échecs dans ces projets d'aménagements antiérosifs si au lieu d'imposer partout les méthodes mises au point en 1930 pour l'agriculture motorisée américaine, on avait étudié plus en détail les méthodes traditionnelles et proposé une plus grande diversité des stratégies de lutte antiérosive en fonction à la fois des conditions écologiques et des conditions socio-économiques locales.

Dans les pages qui suivent, seront présentées schématiquement une dizaine de situations particulières auxquelles correspondent des aménagements différenciés en fonction du mode de gestion des terres et des situations écologiques générales (surtout le bilan d'eau des types de cultures) et des conditions socio-économiques (surtout la pression démographique).

8.1 - LUTTE ANTIEROSIVE EN ZONE FORESTIERE SUB-EQUATORIALE :

Exemple, zone d'Abidjan en Basse Côte d'Ivoire.

a - Les techniques culturales traditionnelles

Après un défrichement progressif sur cinq ans, les paysans Ebriés construisent en février, des petites buttes de 30 cm de hauteur, largement avant la saison des pluies. Ces buttes vont permettre de planter progressivement quantité de plantes associées dans le temps ou dans l'espace. D'une part, une bouture de manioc qui met très longtemps à couvrir le sol, et d'autre part, des plantes qui poussent très rapidement comme le maïs, les arachides, le gombo, des tomates, qui couvrent successivement ces buttes puis fournissent leurs produits en trois ou quatre mois, laissant ensuite une place importante au manioc. Le buttage a plusieurs rôles ; outre celui du drainage et de l'accumulation de terre humifère permettant aux tubercules de bien se développer, il s'agit également d'organiser un drainage et de rassembler des éléments fertilisants autour de la culture. Grâce à la culture mixte, le sol est couvert pendant deux ans.

Parallèlement, on remarque souvent qu'une culture arborée est introduite sous ce couvert de cultures plus ou moins annuelles. Il s'agit de café, de cacao, de palmiers ou d'hévéas. Lorsque le sol est épuisé, on abandonne les cultures à la jachère ou à la culture arborée, en veillant à rabattre le sous-étage sous les arbres. Depuis peu on réduit le nombre d'arbres d'ombrage mais on entretient les palmiers et colatiers.

b - Diagnostic du milieu

Les paysages sont faits de collines convexes, de demi-oranges typiques, de pentes convexes qui peuvent atteindre 40 % sur les bords et de bas-fonds plats ensablés hydromorphes. Les sols des collines sont ferralliques, sablo-argileux, très résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,10$). Ces sols sont perméables mais très acides.

Les pluies annuelles moyennes sont de l'ordre de 2100 mm, tombent en dix mois ; la pluie mensuelle maximum atteint 700 mm en juin, et le drainage annuel, 1000 mm. L'évapotranspiration est réduite (1200 mm). La pluie journalière peut atteindre 250 mm une fois tous les dix ans.

c - Diagnostic sur les risques

Au sommet des collines, sur des pentes faibles, les risques sont de deux ordres.

D'une part dégradation des sols due à la minéralisation des matières organiques, à la battance et à la squelettisation de l'horizon de surface.

Deuxièmement, risque d'acidification due à l'abondance du drainage et à la lixiviation des éléments fertilisants.

Sur les fortes pentes convexes, les risques sont, en plus des précédents, essentiellement des risques de ravinement. Enfin dans les bas-fonds, les risques des sols hydromorphes sont essentiellement des risques d'engorgement en saison des pluies, et de dessèchement en saison sèche. Enfin, ces zones étant souvent tourbeuses et sableuses, sont très acides ; il faudra donc corriger l'acidité de ces sols.

d - Les propositions d'aménagement

Pour faire face aux problèmes de dégradation des matières organiques et de l'acidification des sols, la solution la plus élégante consiste à couvrir de façon permanente les sols par des cultures arborées avec un sous-étage rabattu plus ou moins exploité par le bétail. Sur les plateaux en faible pente, on peut installer des cultures sarclées moins couvrantes de céréales, de manioc ou divers aliments, l'essentiel étant de couvrir le sol pour réduire la dégradation des états de surface et ralentir le ruissellement.

Le deuxième point, c'est de fertiliser les cultures sarclées par des apports fractionnés d'engrais minéraux et organiques. En effet, le drainage est tellement abondant durant la saison des pluies, que la majorité des éléments nutritifs mis dans le sol sont entraînés dans les eaux de drainage aux mois de juin et juillet.

Le troisième point est de restaurer le taux de matières organiques du sol, soit par la taille du sous-étage, soit par l'enfouissement des résidus de culture, ou encore mieux, la gestion des résidus de culture et de paillage à la surface du sol.

Enfin, il est important de planter tôt, de planter dense et d'organiser une fertilisation à la fois minérale et organique, fractionnée en fonction des risques d'entraînement par les eaux de drainage, de la faible capacité de stockage du sol, des besoins physiologiques de la plante, plutôt que des carences du sol. Il est nécessaire d'apporter des amendements calcaires si le pH est situé en-dessous de 4.8 pour éviter la toxicité aluminique.

Sur les fortes pentes, en plus des risques énoncés ci-dessus, il est indispensable de maintenir une couverture permanente, si possible des cultures arborées avec un sous-étage de légumineuses. S'il est indispensable d'y produire des cultures vivrières, il faut prévoir alors, soit le paillage complet du versant, soit des haies vives dont le produit d'émondage servira à couvrir en permanence le sol par un paillage léger, soit encore d'organiser des pâturages.

**FIG. 8.1 - LUTTE ANTIEROSIVE EN MILIEU GUINEEN FORESTIER
SUBEQUATORIAL. Ex. Région d'Abidjan.**

Diagnostic	Pluie	2 100 mm/an	Pluie max. =	700 mm/mois
	Pluie 1/10	250 mm/jour	ETP	1 200 mm/an
	RUSA	1 200	Fort drainage env.	1 000 mm/jour

Sols ferrallitiques sablo-argileux acides perméables

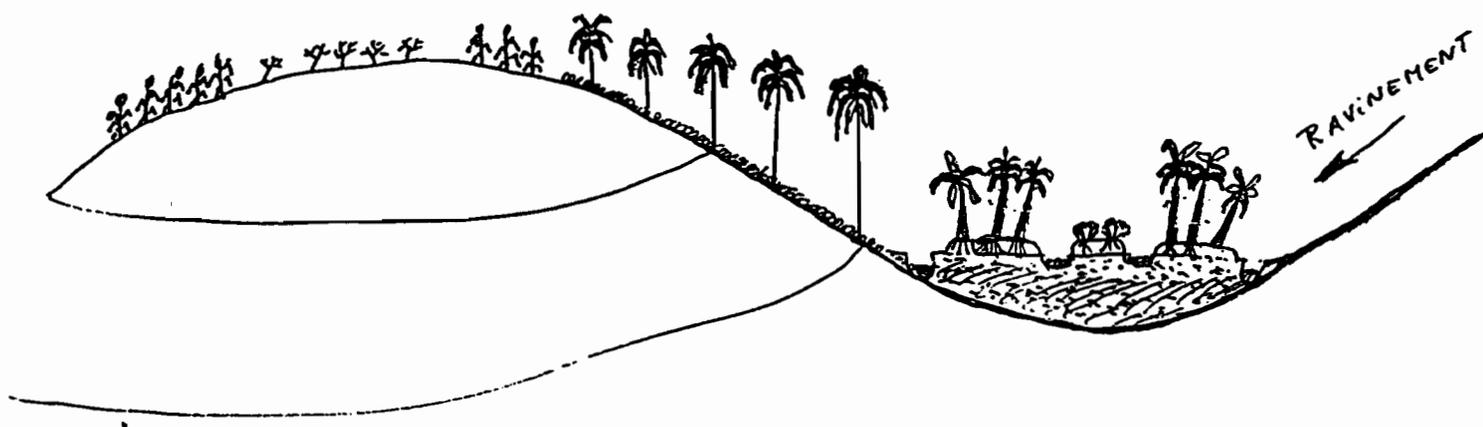
forte érosion
forte lixiviation

Risques

E. nappe
battance
squelettisation
lixiviation
acidification

Idem
+
Ravinement
décapage

Ensablement
Engorgement
Acidification



Aménagements

Plateaux convexes

- Couvrir le sol : planter tôt + dense + cultures associées
- Fertilisation équilibrée avec les besoins des cultures
- Gestion des mat. organiques
- Plantes de couverture/paillis
- Fertilisation organique et minérale d'appoint, fractionnée.

Pentes fortes

- Couverture permanente du sol sous-étage de légumineuses
- Palmiers-hévéa-café-cacao.
- Pâturage
- Si cultures sarclées incontournables, haies vives + paillage léger + fertilisation fractionnée

Vallées

- Drainage en surface
- Interception des apports latéraux
- Irrigation en saison sèche
- Gestion des mat. organiques + fertilisation minérale d'appoint fractionnée
- bananeraies, + horticulture

Enfin dans les vallées, le problème est d'organiser le drainage, les excédents d'eau durant la saison des pluies, de creuser des canaux latéraux pour intercepter les apports d'eau provenant des collines, et de prévoir une irrigation en saison sèche, en particulier pour les bananeraies et l'horticulture. Enfin, il faut prévoir des apports fractionnés de matière organique, de chaux et de nutriments minéraux en tenant compte des risques d'entraînement de ces éléments minéraux par le drainage.

8.2 . LUTTE ANTIEROSIVE EN MILIEU TROPICAL HUMIDE DANS LES SAVANES SOUDANAISES DE KORHOGO (nord Côte-d'Ivoire).

a - Techniques culturelles traditionnelles

- Après un défrichement progressif par brûlis s'étirant sur plusieurs années, les Senoufo construisent de grosses buttes atteignant 60 à 80 cm de haut pour cultiver l'igname ou le manioc.

- Les deuxième, troisième et quatrième années, les paysans disposent entre les buttes des mauvaises herbes, des résidus de cultures et diverses biomasses et les recouvrent avec la terre correspondant à une demi butte provenant de chaque côté. Ils forment ainsi de nouveaux gros billons au-dessus de ces résidus de culture, sur lesquels ils font des cultures associées de maïs, sorgho, arachide et diverses cultures secondaires comme les tomates, le tabac et le gombo.

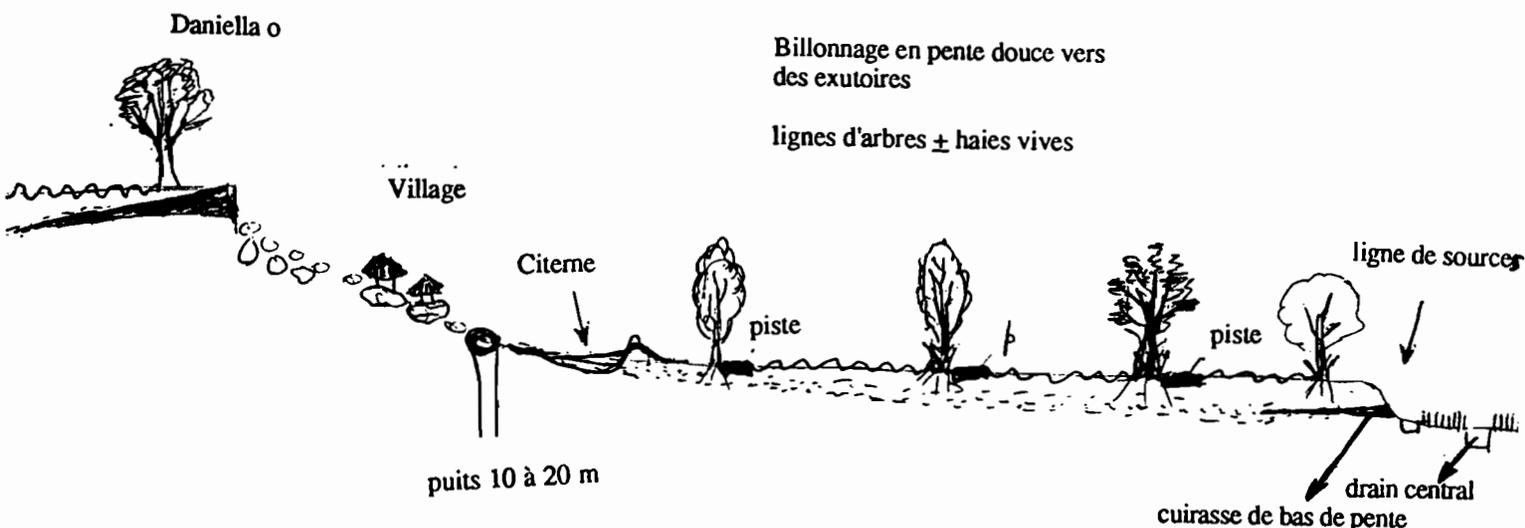
- Les champs forment un damier de petites parcelles billonnées, cloisonnées en bordure dont les eaux, lors des pluies excédentaires, s'écoulent vers un fossé de drainage, évoluant malheureusement souvent en ravine ; l'orientation des billons est quelconque.

- Les Senoufo ont une longue tradition d'agroforesterie. Ils réservent au défrichement toute une série d'arbres d'utilité reconnue tels que le néré, le karité, le kapokier, les baobabs ainsi que le Daniela olivieri et bien d'autres. D'année en année, ils préservent dans le sol les souches de ces arbres tout en les rabattant pour permettre les récoltes.

- Dans les bas-fonds hydromorphes, les Senoufo aménagent des rivières irriguées en creusant un canal d'amener latéral à la vallée avec prise d'eau latérale et drainage central pour évacuer les grandes masses d'eau lors des mois les plus pluvieux.

Figure 9.2 : Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du pays Sénoufo (Korhogo) : exemple d'agriculture exigeant un drainage en zone soudanienne

Plateau cuirassé	Eboulis à gros blocs	Glacis gravillonnaire	Glacis sablo-limoneux sur carapace rouge -> ocre -> gris	Bas-fond à écoulement prolongé
Parcours extensifs + cultures en grosses buttes		Réserve de terres fragiles	Bloc de cultures intensives avec réservoir de souches d'arbres utiles	Rizières + jardins fruitiers bananiers
pente < 0,5 %	< 20 %	8 à 3 %	3 à 1 %	1 à 0,1 %



Sols ferrallitiques

très pauvres en matières organiques, en bases, carencés en N et P
très désaturé car fort drainage et risque d'engorgement pendant 2 mois
souvent gravillonnaires, séchant rapidement

Dangers

- dégradation des matières organiques
- acidification des terres de plateau
- ravinement des bas de colline et à partir des villages + pistes
- Engorgement temporaire : pourriture des tubercules
- Erosion en nappe -> rigoles -> ravines
- Lixiviation des nutriments, acidification
- Inondations en août + sept.
- Ensablement à partir des ravines

Aménagements

- Fertilisation organique et minérale des terres de plateau profondes
- le reste, parcours à reboiser (cajou, teck, eucalyptus)
- En aval : les villages + puits
- Cisternes sur les chemins d'eau pour irriguer de petits jardins fruitiers
- Blocs de cultures associées sur billons
- Gros billons en pente douce ± cloisonnés avec riz sec dans les sillons
- Drainage en bordure par des exutoires enherbés : pistes en période sèche
- Agroforesterie : haies vives et lignes d'arbres tous les 25 à 50 mètres pour former des talus progressifs
- Isoler les champs du bétail par des haies vives
- drainage central irrigation latérale rizière + fourrage en saison sèche
- en bordure jardins potagers fruitiers hors saison

b - Diagnostic sur le milieu.

- Les pluies annuelles moyennes varient de 1.000 à 1.400 mm. Les pluies mensuelles maximales peuvent atteindre 400 mm et provoquer un drainage de 400 à 200 mm par an. L'indice d'agressivité est très important, de 700 à 500 et la pluie journalière de fréquence décennale peut atteindre 140 mm par 24 h.

- Le paysage est formé de collines latéritiques horizontales ou bien de dômes granitiques suivis d'éboulis de gros blocs et de longs glacis à pente diminuant de 5 à 1 %. Dans les bas-fonds, les sols sont hydromorphes, sableux et humifères. Traditionnellement, ils servaient de réserve de fourrage pour le bétail en saison sèche mais depuis une cinquantaine d'années, une forte proportion de bas-fonds est transformée en rizières irriguées. Les sols des collines sont ferrallitiques très désaturés, souvent gravillonnaires, résistants à l'érosion mais acides et très pauvres au niveau chimique. Alors que l'ensemble du profil est de type ferrallitique, les horizons superficiels évoluent actuellement vers des sols plutôt ferrugineux tropicaux. En bas de pente apparaît une ligne de source et dessous, des sols grisâtres, hydromorphes, généralement sablo-argileux, consacrés à la culture du riz.

c - Les risques.

Sur la colline, les sols sont bien structurés et drainants. Ils subissent des risques d'acidification par des engrais, de dégradation des matières organiques comme tous les sols tropicaux, de lixiviation, vu la grande masse de drainage passant à travers ces sols. Si ces sols sont soumis à la mécanisation, ils vont perdre progressivement la majorité de leur matière organique et de leur résistance à la battance par les gouttes de pluie. Ils deviennent donc sensibles à l'érosion et au ruissellement. Sur les fortes pentes, on constate dans les zones à forte population ou là où l'on a un surpâturage et des feux tardifs, le développement de ravines en bas de colline. Sur le glacis central cultivé, en plus des risques de dégradation des sols, d'acidification et de lixiviation, on peut craindre que l'érosion en nappe se transforme en ravinement, d'autant plus qu'avec les apports provenant de ruissellement des collines, on peut craindre aussi un engorgement à la surface du sol et une pourriture des tubercules.

d - Propositions d'aménagement.

Dans la zone du plateau cuirassé, dans les éboulis et dans le glacis gravillonnaire, on peut prévoir l'amélioration du potentiel forestier par des reboisements de cajou, de teck, mais aussi d'arbres fourragers.

C'est aussi dans cette région que se situe l'habitat en zone dense et autour de cet habitat, peuvent être prévus de petits jardins fruitiers, irrigués à partir de puits. En effet, en-dessous de la zone gravillonnaire, se trouvent des altérites qui restent humides près de la capacité aux champs pendant pratiquement toute l'année. En bas de cette zone, on pourrait prévoir le creusement de citernes pour permettre l'alimentation du bétail et alléger le puisage des eaux pour le bétail et pour le village dans les puits, dans les nappes pérennes dont les eaux sont situées entre 10 et 30 mètres de profondeur.

Au niveau du bloc de culture, il est souhaitable de garder des champs de petite taille billonnés, en pente douce, plus ou moins cloisonnés avec éventuellement un semis de riz sec dans le sillon. En bordure des champs, prévoir une bande enherbée avec des arbres pouvant servir de piquets verts ou bien des haies vives capables de limiter la divagation du bétail. Ailleurs, il faut aménager des exutoires pour permettre durant les mois les plus humides, d'évacuer les eaux de drainage excédentaires et durant les mois les plus secs, de servir de piste enherbée pour évacuer la production.

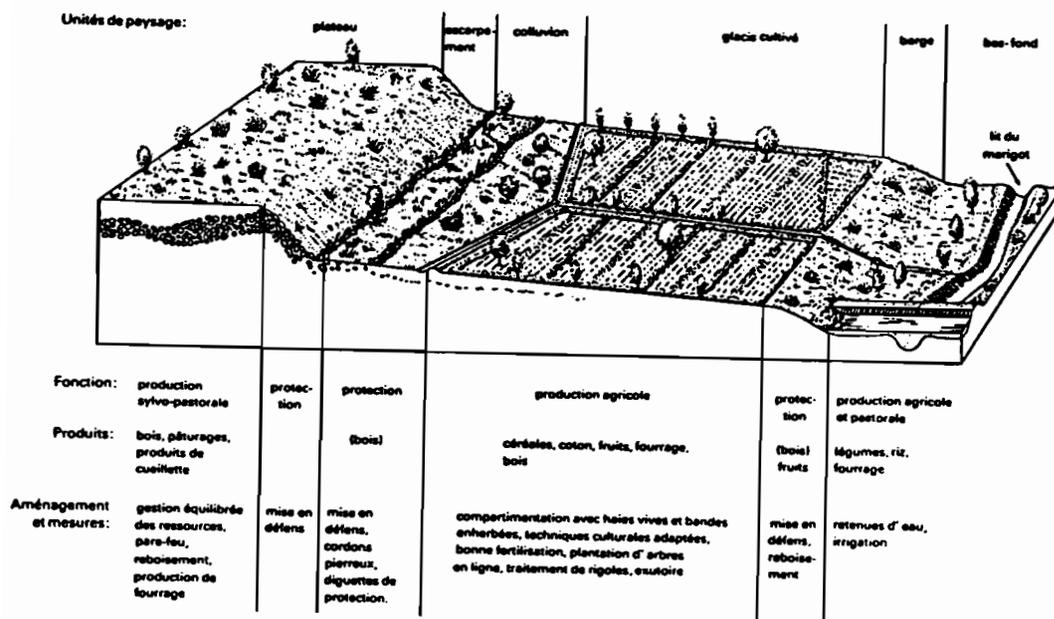
Au niveau du bas-fond, il faut organiser une rizière avec deux fossés latéraux recueillant les eaux sortant des lignes de source et captant en amont les eaux de la rivière. Au centre de la vallée, il faut organiser le drainage par où passe la rivière et où l'on peut écouler des excédents d'eau. Sur les bords de cette vallée, on peut organiser des jardins potagers et fruitiers, en particulier à faible distance des lignes de source. Enfin, il faut prévoir la culture de fourrage en saison sèche à l'emplacement des rizières et vers les points les plus humides de la vallée. Là aussi, il faut prévoir des haies vives pour mieux gérer le bétail.

8.3. LUTTE ANTIEROSIVE EN MILIEU TROPICAL DE SAVANE DANS LA REGION DE KOUTIALA AU MALI. Exemple d'agriculture pluviale sensu stricto (rainfed farming).

a - Techniques culturelles traditionnelles.

Traditionnellement, les Miniancas utilisaient jadis les terrains sableux et même gravillonnaires du haut des versants et situaient leurs villages sur les cuirasses latéritiques pour prévoir l'arrivée d'éventuels ennemis. Actuellement, ils effectuent un labour puis deux sarclages-buttages légers aux boeufs. Avec la mécanisation et la traction animale, les terrains cultivés sont maintenant situés sur le glacis limono-sableux. Il se développe également différentes cultures fruitières, des jardins et des rizières, dans les bas-fonds.

Figure 9.3 : Schéma d'aménagement d'un versant en pays Minianka ; exemple d'agriculture pluviale au sens strict (rainfed farming)



D'après Hijkoop, Poel, Kaya, 1991

L'élevage est toujours extensif, les animaux sont entraînés par un berger souvent étranger sur les parcours pendant la saison des pluies, ils profitent des résidus de culture après la récolte et des derniers herbages verts dans les bas-fonds vers la fin de la saison sèche.

Le soir, les boeufs sont réunis dans des parcs protégés par une accumulation de bois, il se fait donc dans ces zones, de la poudrette, c'est à dire des déjections desséchées et réduites en poudre par le piétinement des animaux. Les besoins en bois ont été comblés jusqu'ici par prélèvement dans la zone du parcours. Actuellement, il est maintenu dans le bloc cultivé un parc de karité, Néré, rarement *Faidherbia albida*. Les bas-fonds sont encore peu exploités sauf pour produire du riz lorsque la vallée est suffisamment large, ou du fourrage en tête de vallée pour le bétail, en saison sèche. Les paysans ont conscience de la dégradation progressive de leur environnement sous l'effet d'une culture de plus en plus intensive de coton et de céréales. Ils demandent de protéger leurs blocs de cultures des nappes d'eau ruisselante provenant du parcours assez dégradé et des collines latéritiques.

b - Le diagnostic du milieu.

Les pluies diminuent progressivement de 1.000 à 700 mm. La pluie mensuelle maximum est égale à 250 mm et le drainage diminue de 200 pratiquement à 0. L'indice d'érosivité de Wischmeier R.USA varie de 350 à 500 et la pluviométrie journalière décennale = 120 mm. Les sols ferrugineux tropicaux peu acides, peu désaturés, limoneux, sont fragiles à la battance des pluies. Comme dans les cas précédents, le paysage est formé de collines latéritiques ou de dômes granitiques suivis d'éboulis, et cette fois-ci de très longs glacis de plusieurs kilomètres qui se terminent par une berge ou par des bas-fonds plus ou moins larges et dégradés par le surpâturage.

c - Diagnostic des risques.

Sur les lits de sols gravillonnaires sous cuirasses de la colline, les dangers proviennent d'une dégradation de la végétation par surpâturage, qui entraîne la dégradation des conditions d'infiltration des eaux dans le sol, la concentration de ruissellement et la formation de ravines profondes qui peuvent décaper sérieusement les versants. En ce qui concerne le glacis cultivé, outre la dégradation des sols par minéralisation des matières organiques et par la battance des gouttes de pluie, il faut signaler le ravinement provenant des ravines ainsi que le dépôt de paquets de sable et de gravillons, enfin une squelettisation de l'horizon superficiel soumis à des travaux culturels assez fréquents. Les risques particuliers à la zone hydromorphe des bas-fonds, concernent la dégradation par surpâturage et le ravinement du lit, l'ensablement provenant des ravines venant des collines latéritiques et traversant tout le bloc de culture.

d - Les aménagements.

Sur le plateau cuirassé, il faut tendre à freiner le ruissellement par des cordons de pierres, régénérer les herbes et les arbustes fourragers donc reconstituer le stock de capital fourrager. Enfin en bas de cette zone, on peut imaginer le creusement de citernes avant des digues de protection qui récoltent les eaux de ruissellement sur 400 m et les orientent vers des exutoires aménagés qui vont évacuer les eaux de ruissellement durant les pluies excessives du mois d'août et qui peuvent, en saison sèche, servir pour évacuer la récolte de coton.

Dans la zone des glacis, il s'agit essentiellement d'aménager les exutoires enherbés pour évacuer le ruissellement et les récoltes, d'isoler les parcelles par des haies vives et des arbres, d'équilibrer, au niveau de la parcelle, les bilans des matières organiques et des nutriments, et enfin de favoriser l'infiltration totale par un travail du sol suivi d'un buttage cloisonné. Enfin, dans la zone des bas-fonds, il faut restaurer la fertilité par la fumure organique et les cultures fourragères pour améliorer la production des fruits et légumes. Enfin, dans les casiers rizicoles, on peut envisager une deuxième culture hors sec, permettant aux plantes à enracinement profond de prélever en profondeur les eaux stockées dans le profil du sol. Le casier rizicole peut être aménagé à l'aide de diguettes en terre et en mottes d'herbe, de façon à pouvoir planer parfaitement chacune des parcelles et manifester le haut potentiel de production. La difficulté pour l'aménagement de ces bas-fonds, consiste souvent à faire front aux risques d'inondation lors des fortes pluies. Il faut donc prévoir un canal central pour drainer l'ensemble du bas-fond.

8.4. LUTTE ANTIEROSIVE DANS LES SAVANES SOUDANO SAHELIENNES DE LA REGION DE OUAHIGOUYA (nord-ouest Burkina Faso).

Agriculture sous impluvium (runoff farming)

a - Techniques culturelles traditionnelles.

- Les paysans Mossi ont un comportement de pionniers. Ils défrichent en brûlant progressivement pratiquement tous les arbres à part quelques Acacias, Sclerocaryas, Birreas et Baobabs, etc...

- Il sèment le sorgho sur les meilleures terres et le mil sur les terres sableuses, en poquets tous les mètres, sans aucun travail du sol, dès les premiers orages de saison des pluies. Ils recommencent les semis deux à cinq fois si nécessaire, puis assurent deux sarclages à la houe. Sur les terres sableuses du nord, le sarclage s'accompagne d'un débattage qui améliore la rugosité et l'infiltration.

- Pour faire face à l'épuisement des terres, les paysans apportent des matières organiques (2 à 5 t/ha de poudrette de parc et des cendres ménagères ou encore un paillage de tiges de céréales et de rameaux de légumineuses peu appréciées par le bétail comme *Piliostigma reticulatum* et *Bauhinia rufescens*, ou bien ils abandonnent la terre à la jachère pâturée.

Pour récupérer les terres épuisées, ils déploient la méthode du zaï qui consiste à piéger le ruissellement dans une petite dénivellation, d'y mettre une fumure organique localisée, laquelle va être améliorée par l'activité perforatrice des termites qui vont permettre, après un premier orage, de piéger une centaine de millimètres d'eau (Roose, Piot, 1984, Roose, 1990 et Roose et Rodriguez, 1991).

La tradition des bolis ou trous d'eau de quelques mètres cubes avec rejet des terres vers l'aval en demi-lunes, permet également de récupérer une fraction des eaux de ruissellement pour alimenter en eau le bétail près des parcours et irriguer un petit jardin (Duguet, 1987). Enfin, s'ils manquent de terre, les paysans Mossi récupèrent, grâce à des alignements de pierre croisés en structures en nid d'abeille, y récupèrent les "zipelle", surface de terre érodée, dénudée et encroûtée où la jachère ne peut même plus se développer par défaut d'infiltration. Ils entourent leurs parcelles d'alignements de pierres, d'herbe ou de piquets pour ralentir le ruissellement et provoquer le dépôt de sédiments grossiers et perméables. Dès la seconde année, cet horizon sableux régénéré est travaillé, fumé et planté : il n'est pas rare d'y récolter 800 kg/ha de sorgho (Wright, 1985).

Comme dans le cas précédent, les troupeaux sont menés de façon extensive sur les parcours pendant la saison des pluies. Ils récupèrent les résidus de culture après les récoltes et ensuite, se débrouillent comme ils peuvent en errant à travers tout le territoire.

b - Diagnostic du milieu.

Les pluies annuelles diminuent de 700 à 400 mm. Les pluies mensuelles maximum, dépassent rarement 100 mm et le drainage n'est qu'occasionnel, de 50 à 0 mm. L'agressivité des pluies diminue de 400 à 200, la pluie journalière de fréquence décennale dépasse rarement 100 mm. Le paysage est très voisin du précédent mais il est formé de collines latéritiques ou de dômes granitiques et de très longs glacis, suivis de bas-fonds plus ou moins larges. Sur les collines, les lithosols gravillonnaires plus ou

moins cuirassés sur altérite profonde, contiennent très peu d'eau. Par contre, les altérites en profondeur sont humides pendant toute l'année. Le glacis est formé de sols ferrugineux tropicaux lessivés, limono-sableux en surface et plus argileux en profondeur. Quant aux bas-fonds, ils sont hydromorphes, plus ou moins sableux ou limoneux selon les cas.

Diagnostic des dangers.

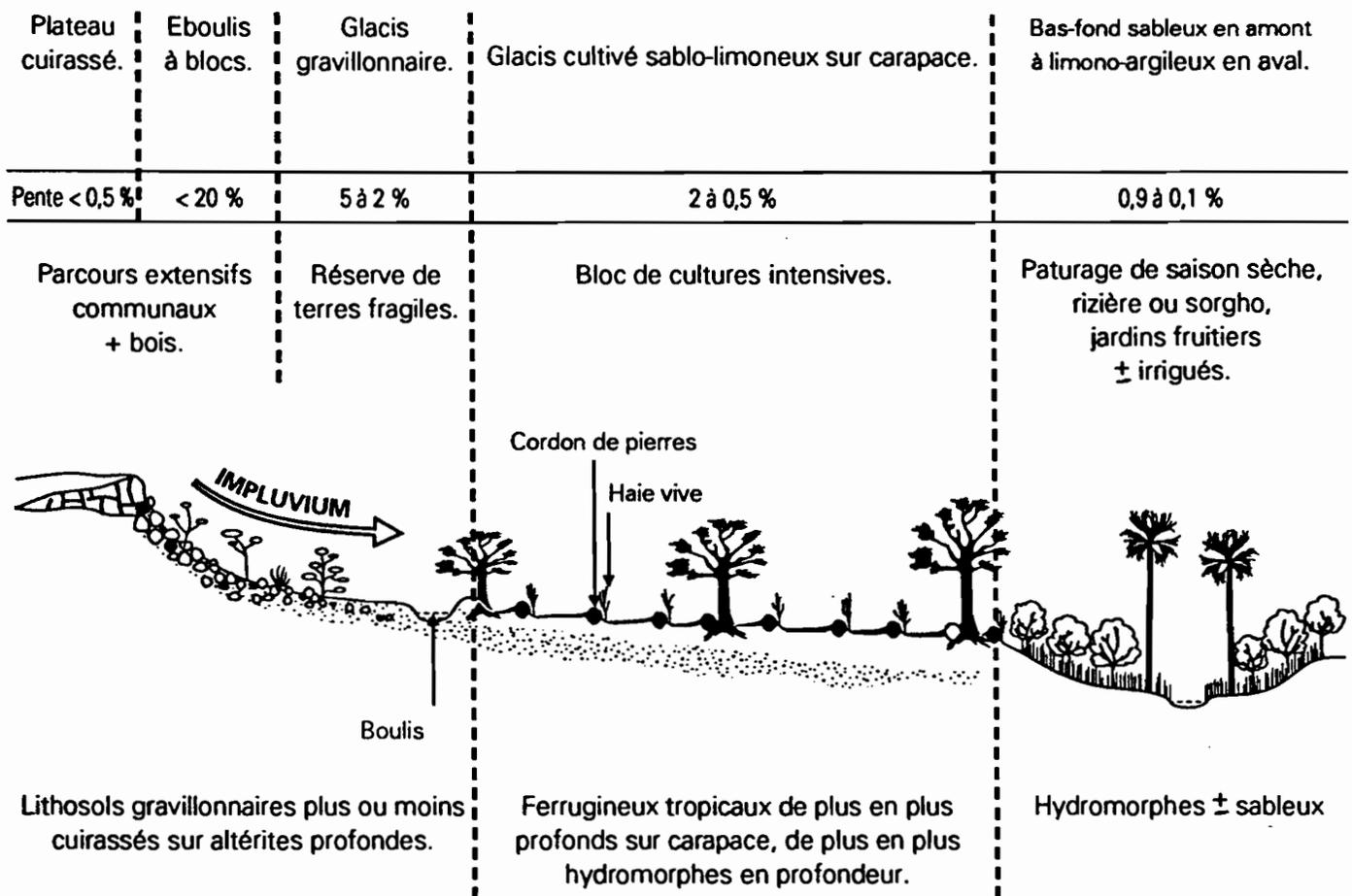
Sur les lithosols gravillonnaires des collines latéritiques, la réserve hydrique étant faible, le surpâturage entraîne une dégradation de la végétation qui à son tour, réduit l'activité de la mésofaune, forme des croûtes de battance et de sédimentation à la surface des sols et favorisent un ruissellement abondant aboutissant à la formation de ravines. Sur les blocs de culture, on constate très souvent une dégradation poussée de la fertilité des sols, acidification et squelettisation de l'horizon de surface qui devient très sableux, facilement érodé et battu par les pluies. En plus il reçoit les produits du ravinement venant des collines donc des dépôts sableux et gravillonnaires. Du point de vue chimique, ces sols ont une très faible réserve en éléments nutritifs. Il faut donc parvenir à nourrir la plante au fur et à mesure de ses besoins alimentaires. Enfin au niveau des bas-fonds, il faut déplorer la dégradation générale des sols par surpâturage et par culture sans restauration de matière organique ou d'aliments nutritifs. De plus, les ravins provenant de l'amont entraînent à leur tour le ravinement du fond du lit de la rivière et/ou l'ensablement général du bas-fond.

d - Propositions d'aménagements.

Sur les collines cuirassées et le glacis gravillonnaire, il faut prévoir l'amélioration des parcours, leur reforestation avec l'aide d'essences fourragères. Pour ce faire, il faut envisager de freiner le ruissellement par des cordons de pierres et réimplanter des herbes, suite à un travail léger à la surface du sol. Si les sols sont trop dégradés, un sous-solage sur des lignes de plantation d'arbres, peut avoir une influence durable, tout au moins dans le glacis gravillonnaire. Enfin, on peut penser à améliorer le stockage du ruissellement soit par la confection de demi-lunes ou de fossés d'absorption totale des eaux, soit par le creusement de citernes appelées "boulis" pour procurer de l'eau au bétail ou pour une irrigation d'un petit jardin.

En ce qui concerne le bloc cultivé sur glacis limono-sableux, on peut prévoir d'une part des micro-barrages perméables tous les 20 à 25 m, d'autre part, la création d'une haie vive avec des arbres tous les 5 m en bordure des champs pour reconstituer le

Figure 9.4 : Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du Plateau Mossi : agriculture sous impluvium (Runoff Farming)



Sols pauvres : carences en N et P et parfois K, Ca, Mg et oligoéléments : pH 5 à 6,5.

Sols fragiles : croûte de battance, faible infiltration, semelles de labour, pauvres en matières organiques.

Restauration de la fertilité des sols (voir Zaï) : - travail du sol, + fumier localisé, + compléments N, P, K + maîtrise du ruissellement, + sorgho ou légumineuses à fort enracinement.

Aménagements

Impluvium non cultivé

- Stockage du ruissellement.
 - 1/2 lunes, microcatchment.
 - boulis pour le bétail.
 - { pour irriguer un jardin.
 - lac collinaire sur site favorable.
- Mise en défens (contrat de 5 ans).
 - enrichissement en cubes fourragers sur ligne de sous-solage.
 - enrichissement en herbage derrière des cordons de pierres.
 - protection contre les feux.
- Pâturage organisé par le berger communal

Cultures pluviales

- Ralentir le ruissellement.
 - haies vives + arbres en bordure.
 - cordons de pierres.
 - lignes d'herbes *Andropogon* toute les 10 à 25 m.
- Former un bocage contre le vent.
- Semis précoce dense, buttage cloisonné pour augmenter le stockage d'eau.
- Jardins irrigués derrière les boulis.
- Organiser des couloirs pour le bétail.
- Rotation des parcs à bétail.
- Fosse fumièrre / compostière près de l'habitat.
- Fertilisation complémentaire à la demande des cultures.

Cultures irriguées + jardins fruitiers à contre-saison.

- Étaler les crues.
- Piéger les sédiments fertiles.
 - diguettes filtrantes.
 - diguettes en mottes / casier rizicole.
 - petit réservoir villageois.
- Alimenter la nappe, pour augmenter la sécurité en période sèche.
- Éviter les grands arbres qui pompent trop dans la nappe.
- Maintenir une zone fourragère filtrante.

parc à karité, *Acacias albida* et à diverses légumineuses. Les micro-barrages perméables peuvent être constitués de cordons de pierres ou d'herbes, l'objectif à atteindre, à long terme étant de former un bocage isolant des champs de culture suffisamment vastes par des haies vives permettant de gérer le bétail soit en l'isolant à l'intérieur des champs durant la période où ils consomment des résidus de culture, soit en l'empêchant de rentrer dans les champs lorsque les cultures sont en pleine croissance pendant la saison des pluies.

Enfin, dans les vallées irriguées, on peut envisager la formation de diguettes filtrantes en tête des vallées pour étaler les crues, piéger un petit peu d'eau et de sédiments et pour réalimenter la nappe, augmenter la sécurité en prévoyant des jardins potagers et fruitiers de contre saison. Enfin lorsque la vallée est plus large, avec des bassins versants de plusieurs kilomètres carrés, on peut envisager des digues en terre retenant suffisamment d'eau pour assurer l'alimentation en eau du village. Etant donné que dans cette zone il n'y a pratiquement plus de cultures de rente, il faut donc que tous les aménagements envisagés soient extrêmement bon marché, à portée de n'importe quel paysan, et ait un impact immédiat sur l'autosuffisance alimentaire. On pourra apprécier au chapitre 4.8, sur les structures perméables, à quel point cette méthode de micro barrages perméables peut améliorer les rendements et satisfaire à la sécurité et à l'autosuffisance de ces régions très pauvres.

8.5. LUTTE ANTIEROSIVE DANS LA ZONE NORD SAHELIENNE, AUX ALENTOURS DE LA MARE DE DORI

Cultures localisées dans les bas-fonds (valley farming)

a - Les techniques culturelles traditionnelles.

Dans la zone à moins de 400 mm, on constate une nette rupture avec les précipitations des régions soudaniennes. Les pluies sont plus erratiques et limitées dans l'espace. Alors qu'au nord du Sahara, en milieu méditerranéen où les pluies tombent en saison sèche, il existe plusieurs systèmes pour collecter les eaux de pluie ou de ruissellement, pour faire pousser des arbres et des céréales au milieu de larges impluvium (voir le cas suivant), les stratégies de gestion des eaux dans la zone tropicale sahélienne où les pluies tombent en période chaude, sont peu nombreuses et peu apparentes. En réalité, elles s'appuient sur le choix des cultures en fonction des sols : mil sur sol sableux, sorgho dans les bas-fonds et jardins irrigués autour des mares et sur l'adaptation

aux opportunités des orages (très faible travail du sol mais semis directs, répétés, très peu coûteux en graines (3 kg/ha) et en travail (9 heures), sur de grandes surfaces semées quitte à en laisser une grande partie lors du sarclage.

Enfin, la survie est souvent basée sur la migration à faible distance en vue de récolter le fonio sauvage ou les bulbes de nénuphar. Les habitations sont sur les champs cultivés, de novembre au mois d'août près des greniers et du lieu de traite des animaux. La migration du troupeau sur un pâturage occasionnel est organisée systématiquement (Milleville, 1982).

Mais cette région vit essentiellement du pâturage extensif des troupeaux nombreux qui migrent en fonction des opportunités. L'usage des résidus de culture et même des déjections animales montrent à quel point cette zone manque de bois.

Densité = 10 hommes par km².

b - Diagnostic du milieu.

Les pluies varient de 400 à moins de 150, les pluies mensuelles maximum sont de l'ordre de 175, le drainage calculé est nul, l'indice d'érosivité est inférieur à 200, la pluie journalière de fréquence 1/10 est égale à 80 et la densité de population baisse brutalement à moins de 10 hab/km².

Le paysage est fait de collines dioritiques suivies d'un glacis sableux et ensuite d'un long glacis limoneux aboutissant aux alentours de la mare. Sur le glacis sableux, se sont formées des petites dunes autour des touffes d'herbe et des buissons. Sur les glacis limoneux, surtout là où la nappe n'est pas trop lointaine, persiste encore quelques vieux *Faidherbia albida* et autres épineux. Les sols sont lithomorphes sur les montagnes, sableux sur les dunes et sont des sols brun-rouge subarides aux alentours des marais. Les techniques traditionnelles consistent à semer à plat le mil sur les sables, les sorgho sur les bas-fonds argileux, et d'utiliser les versants comme pâturages extensifs. Enfin, dans les bas-fonds se développent des jardins et un certain nombre de cultures de décrue tout autour de la mare.

c - Diagnostics des risques.

Sur la zone sableuse, les risques sont des risques d'érosion éolienne essentiellement, avec dégradation de la végétation à la fois par le surpâturage et par l'érosion éolienne. Sur le glacis limoneux, sous l'effet de la battance, se développe un ruissellement extrêmement abondant qui évolue en petites ravines.

Figure 9.5 : Schéma d'aménagement d'un terroir sahélien (P <400 mm) : exemple d'un système agropastoral où l'agriculture intensive est limitée à la vallée

Impluvium et parcours

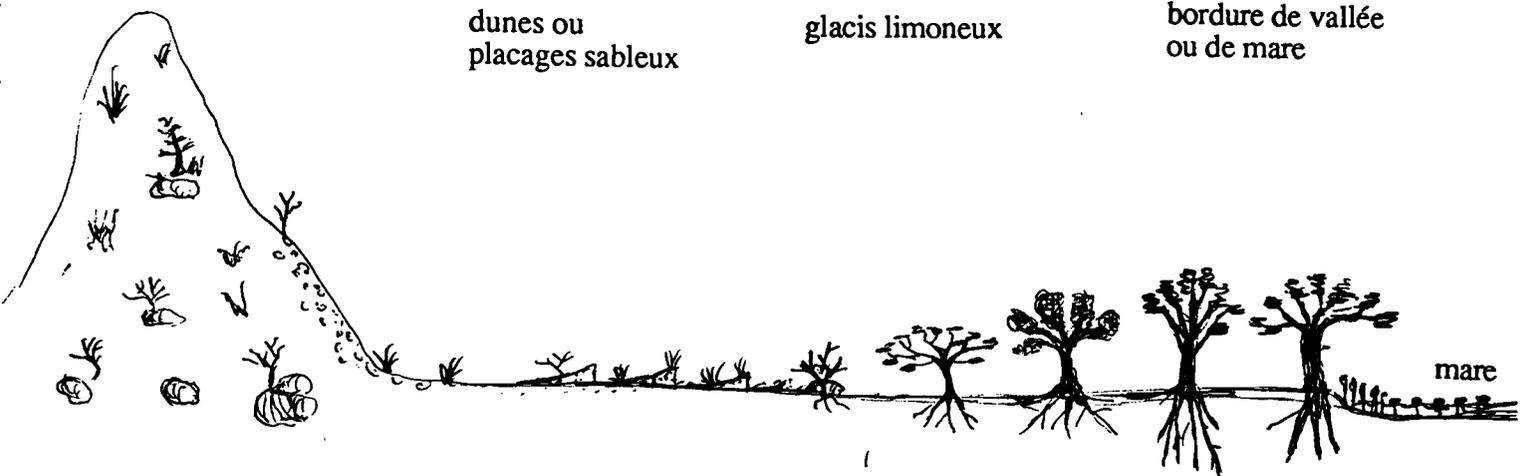
Cultures en sec aléatoires sous un parc de vieux arbres

Cultures intensives irriguées ou de décrue

dunes ou placages sableux

glacis limoneux

bordure de vallée ou de mare



lithosols

sols bruns rouges semi-arides

sols hydromorphes assez fertiles

Sols pauvres : carences en N et P, pauvres en matières organiques, risque de salinisation

Sols fragiles : croûtes de battance et d'érosion, perméables s'ils sont couverts d'une nappe de sable vite battants sur les limons

Risques : battance des sols -> décapage érosion éolienne sur sables

battance, dégradation des M.O. et ravinement

hydromorphie, salure en surface

Aménagement

- Grand impluvium
- Parcours extensifs
- 1/2 lunes ou zaï pour implanter du mil et des arbustes
- Un peu de culture de mil sur les placages sableux
- Capturer le ruissellement pour créer de petites mares pour abreuver le bétail
- Fixer les placages sableux à l'aide d'arbustes pour réduire les risques de dégâts aux cultures voisines par les nappes de sables éolisés.

- Irrigation complémentaire grâce à la nappe par les eaux de ruissellement
- Grands Acacia enracinés jusqu'à la nappe
- Rotations mil-arachide ou niebe
- Si possible, haies vives d'épineux : Acacia, d'*Euphorbia balsamifera* ou de graminées pérennes : *Andropogon*.
- Jardins fruitiers + potagers intensifs irrigués
- Cultures fourragères dans et autour des mares

d - Propositions d'aménagement.

Le milieu étant extrêmement fragile, il est périlleux de conseiller le développement d'un système agro-pastoral au rythme de la croissance démographique. En réalité, le développement semble bloqué aujourd'hui car presque toutes les terres cultivables sont déjà cultivées. Les jachères disparaissant, les sols s'épuisent et le coût des intrants (fertilisation minérale et graines à cycle court) n'est rentable que les années où les pluies sont abondantes et bien réparties (Milleville, 1982). On pourrait cependant expérimenter à l'échelle d'un terroir comme à Keita (Niger) :

- **l'installation de haies vives ou d'épineux fourragers sur les zones sableuses (Balanites, Acacias albida, Acacias nilotica, etc...),**
- **des impluviums collectant les eaux pour des petits champs billonnés sur glacis limoneux,**
- **l'aménagement agro-forestier des bas-fonds (cordons de de pierres, haies vives, arbres fourragers et fruitiers),**
- **l'aménagement des bordures de mares en vue d'une culture intensive diversifiée (fourrage pour la production laitière, céréales, légumes et quelques fruitiers).**

Cependant, il est clair que la production agricole est limitée aux bas-fonds et que l'élevage avec un nomadisme à faible distance est mieux adapté à ce milieu sahélien très fragile.

Bibliographie

- ✕ Bailly *et al* 1974 Etude de l'influence des couverts naturels à Madagascar. Cahier Scientifique n° 4 du CIFT, Paris.
- Bennett H. 1939 "Elements of Soil Conservation". Mac Grow-Hill, N. Y.
- Birat P. 1981 "Les processus d'érosion à la surface des continents". Masson. Processus géomorphologique : 605 pp.
- Bollène M. 1981 L'érosion des sols limoneux en moyenne Belgique. Thèse Doct. Univ. Liège.
- Bonvallet (S.), 1986 - Tabias et Jessour du Sud Tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. Cah. ORSTOM. Pédol, 22, 2 : 163-171.
- Combeau A. 1977 Erosion et conservation des sols. Plan de cours commenté et illustré à l'usage des élèves de l'ORSTOM. Multigr. ORSTOM Paris, hors série : 85 pp.
- ✕ CTFT 1980 Conservation des sols au Sud du Sahara. Min. Coopération, Paris : 296 pp.
- De Boëdt M., Gabriels D. 1981 "Assesment of erosion". Edit. Wiley Chichester (Proceeding, Ghant, 1978) : 563 pp.
- ✕ Dugué (P.), 1986 - L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village. Perspective de développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche. CIRAD/DSA Montpellier, Collection Systèmes Agraires n° 6.
- El Amami (S.), 1983 - Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. Centre de Recherche du Génie Rural, Tunis 69 p.
- El Swaify, Dangler E.W., Armstrong C.L. 1982 Soil erosion by water in the Tropics. HITAH, University of Hawaiï, Honolulu, USA : 173 pp.
- Evenari M., Shanon L., Tadmor N. 1982 The Negev. The challenge of a desert. 2nd edit. Harvard, University Press, Cambridge Mass.
- F.A.O. 1942 "Soil Conservation". An international study, F.A.O. Washington : 189 pp.
- Finkel (M.), 1985 - Turkana Water harvesting manual. FAO, Rome.
- Fournier F. 1960 Climats et érosion. Presses Universitaires de France, Paris.
- Fournier F. 1967 La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. Sols africains, 12, 1 : 53 pp.
- Fournier F. 1972 Conservation des sols. Conseil de l'Europe. Coll. Sauvegarde de la Nature en Europe, Strasbourg. Vol. 5 : 206 pp.
- Gosselin (M.), 1939 - L'hydraulique en Tunisie. Archives de l'Institut Pasteur de Tunis, tome 3
- ✕ Greenland D., Lal, R. 1976 Soil Conservation and management in the humid tropics. Wiley. Proceedings Ibadan 1975 : 283 pp.

- Harroy J.P. 1944 Afrique, Terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation. Marcel Hayez éditeur, Bruxelles : 557 pp.
- Heusch, Kulman, Robert, Duhamel 1972 "Etudes sur l'érosion au Maroc". Annales de la Rech. Forestière au Maroc, n° spécial Rabat ; t 12 : 990.
- Hudson N.W. 1971 "Soil Conservation" Butisfind : 320 pp.
- × Hudson N.W. 1981 "Soil Conservation " Butisfind 2rd ed. : 324 pp.
- ×× Hudson N.W 1990 - Conservation des sols et des eaux dans les zones Semi-arides - FAO Bulletin Pédologique n° 57. Rome, 182 p, version française adaptée par Roose.
- Jansson M. 1982 Land erosion by water in different climates. Uppsala University Naturgeografis... Institutionen n° 57 : 151.
- König (D.), 1991 - Contribution des méthodes agroforestières à la lutte antiérosive au Rwanda. Bull. Réseau Erosion, 11 : 185-191.
- Kohnke H., Bertrand A. 1959 Soil conservation. Mc Graw-Hill Book Company, New York : 298 pp.
- × Lamachère (J.M.), Serpantié (G.), 1991 - Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs de mil en zone Soudano-Sahélienne. Région de Bidi, Yatenga, Burkina Faso. Bull. Réseau Erosion, 11 : 88-104.
- Morgan R.P.C. 1982 "Soil Conservation. Problems and perspectives. Edit. John Wiley, Chichester. (Proceeding of Conservation . 8e Intern. Conf. Silsoe, U.K.) : 570 pp.
- Nahal, 1975 Conservation des sols. Masson.
- Rapp, Berry, Temple "Soil erosion and sedimentation in Tanzanie. Edit. Dept. Physical Geography Univ. Uppsala. Synthèse d'étude en zone semi-aride et en montage.
- ×× Reij (C.), Mulder (P.), Begeman (L.), 1988 - Water harvesting for plant production. World Bank Technical paper n° 91, Washington USA, 123 p.
- ×× Rochette (R.), 1989 - Le Sahel en lutte contre la désertification. CILLS/PACC/GTZ, Weikersheim, Allemagne, 592 p.
- Roose E. 1967 Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agron. trop. 22, 2 : 123-152.
- Roose, E.J. 1970 Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogénèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Deux années de mesure sur parcelle expérimentale. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 8, 4 : 469-482.
- Roose E.J. Bertrand R. 1971 Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest.- Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. Agron. Trop. 26, 11 : 1270-1283.
- × Roose E. 1977 Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest..... en petites parcelles - ORSTOM Paris, sér. Travaux et Documents, n° 78 : 108 pp.

- Roose E. 1980 Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrauliques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. ORSTOM Paris, série Travaux et Documents, n° 130. Thèse Doct. Etat Orléans : 587 pp.
- × × Roose (E.), 1990 - Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale Soudano Sahélienne. Définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. Bulletin Réseau Erosion 10 : 98-107.
- Rwehumbiza (F.B.), Roose (E.T.), 1991 - Land husbandry. A nex strategy for soil and water management in the farming systems at upper Mgeta, Uluguru Mountains, Morogoro, Tanzania. Sokoïne Univ. Projet PFTDH, Morogoro, Tanzania : 11 p. Projet Soil Technology.
- Saadi A. 1981 Détermination de la sensibilité du milieu en vue de l'aménagement par analyse des données. Application à deux secteurs du littoral Oranais (Algérie). Thèse 3ème cycle Univ. Pasteur Strasbourg. Analyse factorielle des correspondances.
- Serpantié (G.), Martinelli (B.), 1987 - Les points de vue de l'Agronome et du Sociologue sur la confrontation des paysans aux aménagements dans le Yatenga. Doc. ORSTOM Ouagoudougou.
- "Soil erosion : prediction and control" 1976 Soil Science Society of America, special publication n°
- Stallings 1957 "Soil Conservation", Prentice Hall, H.Y. : 575 p.
- Tondeur (G.), 1950 - Erosion, spécialement au Congo Belge. Publication Ministère des Colonies, Bruxelles, 3ème édit., 240 p.
- Tricart J., Cailleux M. 1965 Traité de Géomorphologie. Sedes, Paris, vol. 1-5.
- Vogt H. et T. 1979 "Erosion agricole en milieu tempéré non méditerranée". Edit. Vogt, Lab. Géogr. Phys. Strasbourg (Proceeding, Strasbourg - Colmar).
- × Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978 Producing rainfull erosion l.... A guide to conservation planning. USDA : Agriculture Rand book, n° 537 : 58 pp.

CHLEP (J.L.) et Dupriez (H.), 1986.
 "Les métiers de l'eau de Sahel" 125p.
 Ed. Terres et Eau, Hamattan, ENDA, Nivelles, Belgique

**La gestion conservatoire de l'eau
et la fertilité des sols (G.CES) :
Une nouvelle stratégie pour l'intensification
de la production et la restauration de l'environnement
en montagne.**

par

Eric ROOSE : Directeur de recherche en Pédologie
à l'ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier - France.

François NDAYIZIGIYE : Géographe, chef du programme EMSP,
Management de l'eau et du sol, ISAR, BP 138, Butare.

Léonard SEKAYANGE : Agronome, EMSP, programme farming system, ISAR.

Justin NSENGIMANA : Agronome, directeur de la CES
(Minagri BP 641 Kigali).

1 - AVERTISSEMENT

Cet article est le fruit d'une troisième mission de consultation de Eric ROOSE, spécialiste en conservation des sols de l'ORSTOM - auprès du programme Management de l'eau et des sols de l'ISAR. Il a fait l'objet d'une conférence à l'Atelier sur la Recherche en conservation des sols qui s'est tenu à Rubona du 14 au 16 novembre 1991.

Il fait suite au premier article publié dans le Bulletin Agricole du Rwanda n° 21,4 : 264-277 auquel les lecteurs sont priés de se reporter pour mieux saisir l'évolution rapide des concepts de lutte antiérosive au Rwanda ces dernières années.

2 - RESUME

Ruissellement et érosion en montagne sont des phénomènes plus complexes que prévu par la plupart des techniciens concernés : ils ont à faire face à des problèmes techniques (inadaptation du référentiel technique) et à des implications sociologiques et économiques nombreuses : problèmes fonciers, objectifs et priorités des paysans selon leurs disponibilités en main d'oeuvre, en terre, en pâture et en intrants divers, possibilités de valorisation des produits et d'amélioration du niveau de vie, etc...

Les résultats de la recherche (4 à 10 ans en petites parcelles) montrent que les risques de décapage des horizons superficiels (par érosion en nappe, en rigole et par le travail du sol) sont graves sur les pentes raides (25-60 % de pente) des collines cultivées (1 à 3 cm par an). Cependant il existe quatre solutions pour stabiliser les versants : le paillage (sous les caféiers, bananiers, manioc, légumes), les haies-vives alternant tous les 5 mètres avec de gros billons permanents (terrasses progressives), les terrasses radicales (s'il n'y a pas de risque de glissement et si on dispose de fumier, de chaux et de NPK) et la revégétalisation permanente (forêt, prairie ou verger avec plantes de couverture).

Mais la conservation des sols même parfaitement réussie, ne peut satisfaire les paysans car elle n'augmente pas la production. La plupart des sols sont si pauvres que même si on arrête les pertes par érosion on ne rentabilise pas le travail supplémentaire. C'est pourquoi la G.CES passe par la gestion des

eaux de surface et la stabilisation des versants (préalable) mais aussi par la restauration de la fertilité des terres et donc par l'agroforesterie, l'élevage et la fertilisation minérale complémentaire.

La gestion des eaux de surface (augmentation locale de l'infiltration) devrait permettre d'améliorer la production de biomasse dans la zone des savanes semi-arides de l'Est du Rwanda, mais elle risque d'augmenter le drainage et la lixiviation des nutriments sur les hautes collines humides. Des recherches devraient être entreprises pour stocker les eaux de surface et créer une troisième saison de culture grâce à une irrigation d'appoint. Le choix des structures antiérosives et des techniques culturales doit tenir compte des risques d'engorgement ou d'échaudage selon les saisons.

La gestion de la biomasse (agroforesterie, engrais vert, fumier, compost, paillage) ne suffit pas pour améliorer significativement les rendements des terres pauvres et acides : il faut d'abord restaurer leur fertilité par apport massif de fumier (10 t/ha tous les 2 ans), de chaux (2 à 4 t/ha tous les 3 ans) et d'engrais minéral complet (N 50 à 150, P 40 à 100, K 30 à 200 selon les plantes et les niveaux de production programmés).

L'analyse des coûts de l'érosion permet de mieux cibler les stratégies. La DRS-CES cherche à stabiliser les versants pour réduire les problèmes à l'aval : l'intervention est massive sur les terres les plus dégradées de l'ensemble d'un bassin versant, mais n'améliore pas forcément les rendements du paysan. Si l'objectif est d'intensifier la production, il faut intervenir avec les paysans sur les terres productives pour en tirer le meilleur parti et stabiliser les ravines qui risquent de les ruiner. La LAE n'est plus qu'un volet d'un programme d'intensification de la production. Le coût des aménagements antiérosifs et des intrants indispensables doit orienter le choix des interventions à proposer en fonction des contraintes socio-économiques des paysans bénéficiaires.

3 - INTRODUCTION : LA G.CES, DE NOUVEAUX OBJECTIFS.

Tant que la population est dispersée sur les terres agricoles (10-30 habitants par km²), les problèmes d'érosion sont peu importants et le maintien de la fertilité des terres s'obtient par la migration et le défrichement de nouvelles terres dès que les champs montrent des signes d'épuisement ou d'invasion par les adventices.

Mais au Rwanda, dès les années 1930, les populations concentrées sur certaines collines ont posé des problèmes de famine et de protection des sols. L'administration coloniale a dès lors imposé des cultures pérennes (manioc et café) et des structures antiérosives. Ces stratégies d'équipement rural (RTM, DRS et CES) imposées par l'Etat ont été mal acceptées par les paysans d'autant plus que les techniques imposées exigent beaucoup de travail à l'installation et à l'entretien des structures et augmentent peu les rendements.

Aujourd'hui, le problème se pose en d'autres termes. La population double tous les 12 à 20 ans et dépasse déjà 150 à 800 habitants par km². Les deux tiers des terres cultivées sont acides, épuisées et il ne reste presque plus de réserve de terres cultivables. La pression sur les terres fragiles est telle que les pentes de plus de 80 % sont défrichées, surpâturées ou décapées dès la deuxième année de culture. La surface moyenne de l'exploitation tend vers 0,5 ha par famille. Il n'est plus temps de conserver les sols, ils sont déjà très pauvres et leur niveau de productivité est très bas, (4 à 800 kg de haricot, de maïs ou sorgho, 1-3 tonnes de patates douces ou manioc). Malheureusement il n'existe pas d'industrie pour donner des revenus à l'excès de population rurale et le commerce des produits agricoles est peu développé.

Le nouvel objectif est donc clair : il faut gérer l'eau et restaurer la fertilité des terres pour doubler la production tous les 20 ans, tout en améliorant le niveau de vie et l'environnement rural.

La nouvelle stratégie (Land husbandry ou G.CES) proposée en 1987 aux séminaires de Niamey, de Puerto Rico et de Medea, puis au Rwanda (1988), au Burkina, au Cameroun, au Burundi (1990) et en Haïti (1991), vise donc résolument le développement rural. Elle tente d'abord de répondre aux besoins urgents des paysans, à savoir améliorer la production et sa sécurité, augmenter les revenus et valoriser le travail en développant des systèmes de production agro-sylvo-pastoraux intensifs.

TABEAU I : DIVERSITE DES PROCESSUS, DES CAUSES, DES FACTEURS ET DES CONSEQUENCES DE L'EROSION.

Processus	Causes	Facteurs	Conséquences
Dégradation des sols	Minéralisation des matières organiques	- Température - Humidité - Biomasse restituée	→ Taux matière organique → Stockage eau + nutriments → Porosité, infiltration → Ruissellement
Erosion en nappe	Battance des pluies - tassement - cisaillement - projection	- Couvert végétal 1 000 - Pente 0,1 à 20 200 - Sol 0,01 à 0,30 30 - Structure A.E. 1 à 0,1 10	.Croûte de battance + tassement .Ruissellement .Erosion sélective .Décapage
Erosion mécanique sèche	Travail du sol	- Fréquence - Intensité - Pente - Friabilité	.Décapage horizon humifère
Ravinement	Energie du ruissellement $E = \frac{M \cdot V^2}{2}$	- Volume ruisselé = f { surface b.v. { pluie, intensité - Vitesse = f(pente, rugosité) - Résistance du sol x végétation - Structures A.E : seuils, épis	.Entailles profondes .Déséquilibre des versants .Cônes de déjection
E = en Masse (glissement) versants	Gravité > cohésion	- Poids couverture { sol + eau + { végétation - Humectation du plan de glissement - Pente et drainage	.Décapage des versants .Coulées boueuses

CONCLUSIONS :

1. Diversité des formes, causes, facteurs et méthodes de lutte
2. Variabilité dans le temps et dans l'espace de l'intensité de l'érosion
3. Grande importance des états de la surface du sol

Comment atteindre cet objectif ? En améliorant la gestion de l'eau (augmentation de la capacité d'infiltration des sols, stockage du ruissellement et irrigation d'appoint), et la gestion des fertilisants (gestion de la biomasse, amélioration du turn-over, recyclage biologique et chaulage plus compléments minéraux liés à la fumure organique et aux besoins localisés des plantes cultivées). En cherchant à couvrir le sol toute l'année, on réduit indirectement les risques de ruissellement et d'érosion.

La lutte antiérosive, qui reste indispensable, ne sera plus présentée comme l'objectif principal mais comme une technique inséparable des autres paquets technologiques (fertilisation, graines sélectionnées, rotations rapides, soins phytosanitaires, herbicides, etc.) qui permettent l'intensification rapide de l'agriculture.

On s'intéressera en priorité à la gestion des meilleures terres et ensuite à la restauration des terres dégradées à fort potentiel de production et à la capture des eaux de source, au stockage des nutriments qui pourront servir à l'irrigation d'appoint de pôles de développement (maraîchage et cultures fruitières). Les terres marginales, (plus de 60 % de pente, rocheuses ou trop peu profondes) doivent être exploitées sous couverture permanente du sol (pâturage, arbres forestiers ou fruitiers). Le changement radical d'orientation demande du temps (5 à 10 ans) et se réalise par étapes :

- 1 - Dialogue entre les paysans et les techniciens, enquêtes pour évaluer les risques (où, quand, comment naissent le ruissellement et l'érosion), et la façon dont les paysans les ressentent et tentent de les maîtriser (méthodes traditionnelles favorables ou dégradantes). Bilan de la recherche également.
- 2 - Expérimentation simple avec les paysans sur leurs terres pour comparer la faisabilité, l'efficacité et la rentabilité de différentes techniques. Evaluation par les paysans, les techniciens et les chercheurs.
- 3 - Planification et généralisation à l'échelle du versant, d'une colline ou d'un petit bassin valorisé par une communauté rurale.

Au cours de cet article, nous rappellerons la diversité des processus de dégradation en cause, quelques résultats de la recherche, puis nous approfondirons la gestion de l'eau et de la fertilité des sols, les aspects économiques de l'érosion avant de présenter quelques propositions pour la recherche, les paysans et les autorités nationales.

4 - LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

- 4.1 - Les processus de dégradation des sols et d'érosion sont nombreux, leurs formes et leurs causes sont diverses, les facteurs déterminants sont variés, leur efficacité est très variable dans le temps et dans l'espace de telle sorte qu'il ne peut y avoir de recette universelle.
- Chaque versant exige un diagnostic des conditions écologiques et socio-économiques de la dégradation des sols (état de surface et végétation) ; il faut éviter de renforcer certains processus (les glissements de terrain par ex) en voulant en réduire d'autres (ex : le ruissellement et l'érosion en nappe).

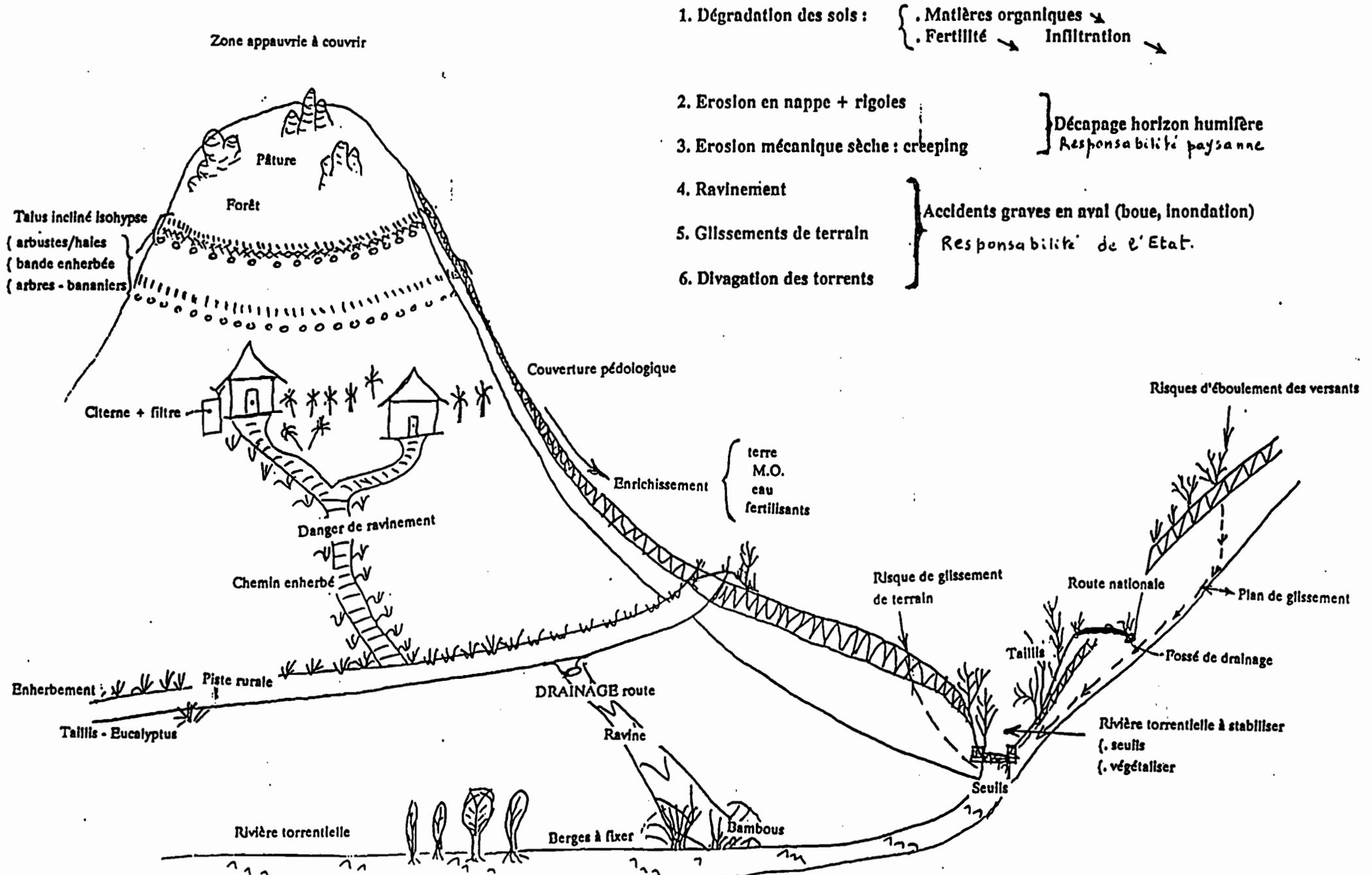
Voir TABLEAU 1.

En montagne les processus d'érosion en rigole et d'érosion mécanique sèche sont exacerbés par les pentes fortes et aboutissent rapidement au décapage des horizons humifères surtout lorsque le sol est dénudé de sa litière et travaillé finement.

La lutte antiérosive concerne différents acteurs et différents processus.

Les paysans sont seuls capables d'entretenir leurs terres contre la battance des pluies (couvert végétal/travail du sol), contre l'érosion mécanique sèche (réduction du travail du sol) et l'érosion en rigole (entretien des états de surface). Par contre, les paysans sont incompetents pour maîtriser le ravinement créé par les routes, les grands glissements de terrain, les écoulements torrentiels de certaines rivières. L'Etat doit également veiller à la formation depuis l'école primaire, les cycles techniques et jusqu'à l'université. (voir fig. 1).

Figure 1 : Six processus aboutissant à la dégradation du milieu rural .



947

4.2 - Quantification de l'érosion en nappe et rigole sur des pentes de 25 à 60 % du Rwanda et du Burundi

TABLEAU 2 - Résultats des mesures d'érosion

Couvert végétal	Aménagement	E t/ha/an	Ruisellement KRAM %
Sol nu	cultivé dans le sens de la pente	300 à 550	10 à 40 %
Manioc ou patates mais/haricots ou pois-sorgho	traditionnel à la houe en culture associées	50 à 150 (300)	10 à 37 %
Id + 200 arbres/ha	(litière 50 kg/arbre/an)	30 à 50 (111)	5 à 7 %
Id + arbres + haies vives tous les 5 à 10 m	biomasse de (3 à 6 kg/m/an)	an 1 : 7 à 16 an 4 : 3 à 1	10 à 15 % 1 à 3 %
Id + A + HV	± billons couverts tous les 5 m	1 à 4	0.1 à 2 %
Bananeraie	ouverte, paillis exporté (10t/ha/an) complète, paillis étalé ou en cordons	20 à 60 1 à 5	5 à 10 % (45) 0 à 2 %
Caféière ou manioc	+ paillis épais (20 t/ha/an)	0 à 1	0.1 à 10 %
Forêts de <i>Pinus</i> , prairies, vieilles jachères	(5-15 t/an de litière)	0 à 1	1 à 10 %

() = valeurs maximales observées.

TABLEAU 2. Erosion et ruissellement en fonction des techniques culturales.

D'après les résultats de l'ISAR à Rubona (NDAYIZIGIYE F., 1988-90), du PASI à Butare (König, 1991) de l'IRAZ (RISHIRUMUHIRWA, 1992) et de l'ISABU (DUCHAUFOR et BIZIMANA, 1992).

Les résultats proviennent d'essais réalisés sur des pentes fortes (27 à 55 %) (sauf pour les bananeraies de l'IRAZ p = 8 %) sur des sols ferrallitiques très désaturés mais assez résistants à l'agressivité des pluies (RUSA/Ham = 0.20 à 0.25).

De ces résultats, il ressort :

- que les risques de ruissellement et d'érosion en nappe + rigole + érosion mécanique sèche sont très élevés sur les sols nus ;
- que les méthodes culturales et les associations traditionnelles réduisent déjà sérieusement ces risques mais pas assez (tolérance = 12 t/ha/an) ;
- que les arbres plantés entre les cultures ne suffisent pas ;

- . que les barrières d'herbes et les haies vives tous les 10 mètres complétées par un gros billon couvert de patates douces ou de légumineuse tous les 5 mètres sont une première solution ;
- . que le paillage (sous bananeraie, café ou manioc) est une autre solution très efficace même sur pentes fortes ;
- . que la reforestation en pins (litière d'aiguilles très efficaces) ou en d'autres essences syvicoles laissant se développer un sous-étage réduisent très vite le ruissellement et l'érosion à des proportions acceptables.

Les fossés aveugles et les terrasses radicales ne peuvent être testés valablement sur ces petites parcelles : ces méthodes peuvent supprimer les risques d'érosion en nappe mais augmenter les risques de glissement de terrains sur les couvertures pédologiques peu épaisses. Ce ne sont pas les structures antiérosives mais les systèmes de production, qui jouent le rôle principal dans la stabilisation des versants.

5 - LA GESTION DE L'EAU

Le défrichage, les techniques culturales et les structures antiérosives modifient considérablement le fonctionnement hydrique des versants et des rivières. Dans ce chapitre nous analyserons : l'évolution du bilan hydrique en fonction de l'augmentation du ruissellement, les causes du ruissellement et les modes de gestion des eaux superficielles en fonction des conditions écologiques avant de discuter des structures antiérosives et des techniques proposées par le Rwanda.

5.1 - Le bilan de l'eau ou l'impact du ruissellement sur le drainage et la production végétale.

A la fig. 2, sont représentés deux bilans hydriques en cas de végétation pérenne à ruissellement faible ($KR = 1-5\%$) et en cas de culture à fort ruissellement ($KR = 20-40\%$).

La courbe 1 représente la hauteur annuelle des pluies qui augmente de 800 mm en zone semi-aride à plus de 2000 mm en zone humide (la Crête Zaïre Nil par ex.).

Les courbes 2 et 3 indiquent que le ruissellement est une perte d'eau pour la parcelle et les plantes, si bien que l'eau utile est plus ou moins largement inférieure à la pluie mesurée au-dessus du couvert végétal.

La courbe 4 délimite vers le bas une lame d'eau évapotranspirée par les plantes ($ETR = \text{pluies utiles en saisons sèches} + \text{dessèchement du profil}$, et $ETR = ETP$ en pleine saison des pluies) et vers le haut, un espace correspondant au drainage résiduel au-delà des racines, qui alimente les nappes profondes et le débit de base des rivières.

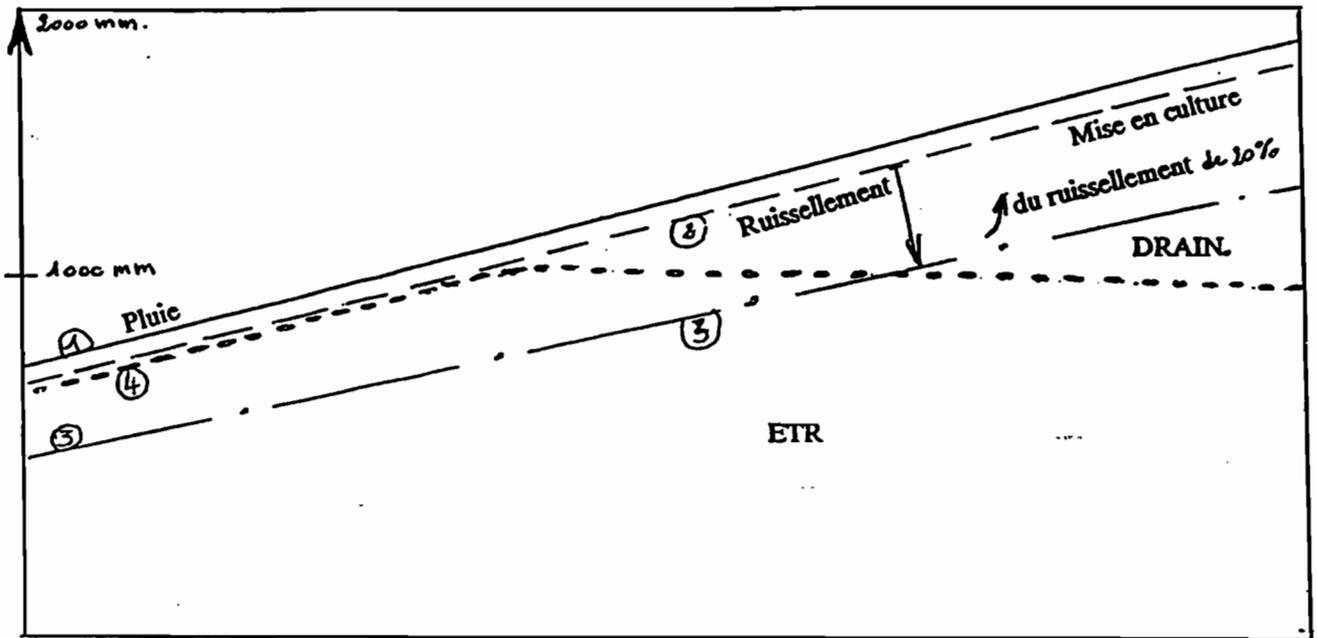
On observe qu'en région humide, l'augmentation du ruissellement réduit beaucoup le drainage... donc le débit d'étiage des sources et des nappes, mais augmente les débits de pointe des rivières et les risques d'érosion des berges.

Par contre, en zone semi-aride, le drainage potentiel est réduit si bien que l'augmentation du ruissellement, suite à la mise en culture, réduit notablement l'ETR, donc le potentiel de production de biomasse.

Par conséquent, l'impact de la lutte contre le ruissellement (et l'érosion) sur les rendements des cultures peut-être considérable en zone semi-aride, mais négligeable en zone humide. C'est là une des causes du manque d'effet de la LAE sur la production des collines humides du Rwanda, l'autre étant la pauvreté chimique et l'acidité des sols.

On peut aussi en conclure que la réduction du ruissellement (ou son captage) dans les savanes sèches de l'Est promet une nette influence sur les rendements des cultures qui y souffrent autant de carences hydriques que minérales.

FIGURE 2 : Bilan de l'eau : Pluie - Ruissellement = ETR + DRAIN ± Stock du sol.



Zone semi-aride

Si Ruiss. ↗

DV → 0
 ETR ↓
 Biomasse ↓

Zone humide

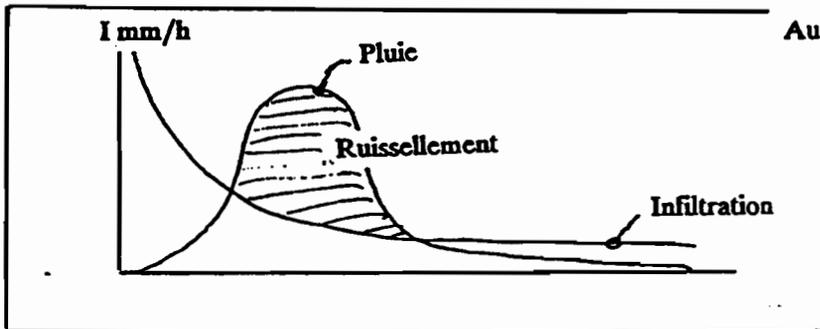
DR ↓ ETIAGE ↓
 ETR →
 Débits de pointe }
 débits solides } des rivières ↑

5.2 - La naissance du ruissellement.

Trois hypothèses de travail permettent d'expliquer comment le ruissellement prend naissance :

a) - Ruissellement est fonction de l'intensité pluie-infiltration (HORTON)

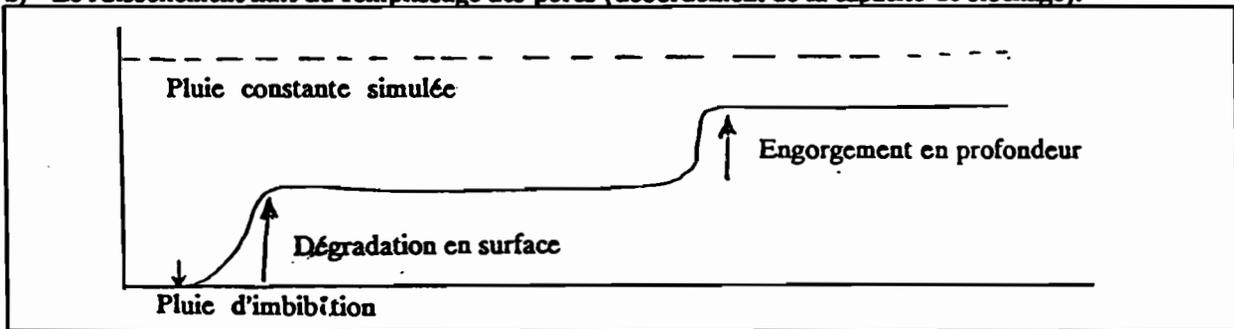
Le ruissellement se développe lorsque l'intensité de la pluie dépasse celle de la capacité d'infiltration du sol.



Au cours du temps, la capacité d'infiltration du sol se dégrade vu l'éloignement du front d'humectation (ψ de la tension capillaire) et la dégradation de la structure à la surface du sol (croûte de battance).

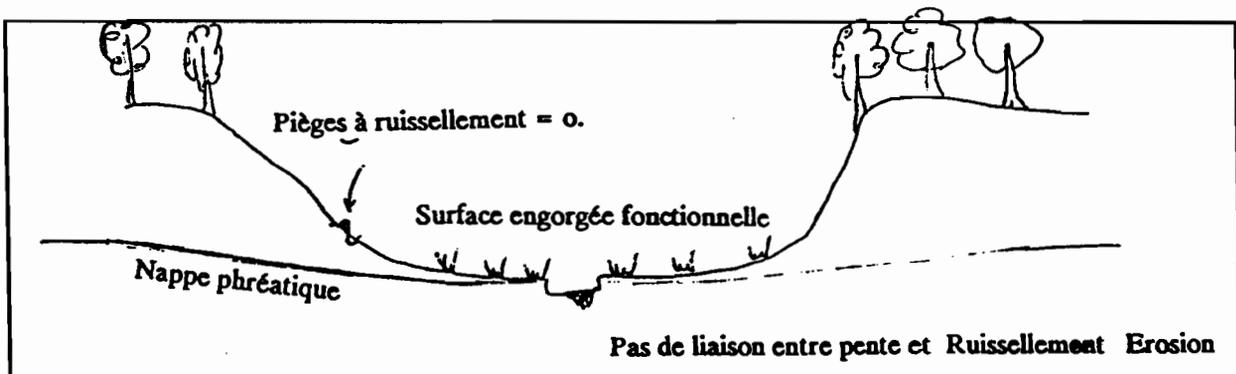
En réalité ce type de fonctionnement ne s'observe que si l'infiltration dépend d'une pellicule de battance à la surface d'un profil parfaitement perméable. Ce cas existe probablement sur les sols battants de la région de Karama (Bugesera) riches en limons et sables fins, pauvres en matières organiques.

b) - Le ruissellement naît du remplissage des pores (débordement de la capacité de stockage).



Le sol est capable de stocker une lame d'eau à sa surface (rugosité) et dans ses pores. Lorsque le sol est tassé, caillouteux ou limité par un horizon très peu perméable, lorsque la pluie a rempli l'espace poral, quelque soit son intensité, elle déborde et ruisselle à la surface du sol.

c) - Participation des aires partielles d'un bassin versant.



Dans un bassin versant, il n'y a que certaines parties qui ruissellent :

- 1 - la rivière en toute saison... d'où des débits faibles mais temps de réaction court,
- 2 - la rivière plus le marécage à nappe affleurante en saison des pluies,

- 3 - l'ensemble du bassin nourrit la nappe dès que le sol a dépassé la capacité au champs, mais le versant ne ruisselle toujours pas en fin de saison humide,
- 4 - l'ensemble du bassin ne ruisselle que si la surface du sol est dégradée : croûte de battance ou horizon tassé par le labour et le pâturage.

Avant de définir la LAE, il faut donc faire le diagnostic du mode de naissance du ruissellement : où démarre-t-il, à quelle saison, lié à quel type d'averse et de système de culture ?

5.3 - Quatre modes de gestion de l'eau en fonction des climats.

Si on trace une transversale à travers l'Afrique de l'Ouest depuis le Sahara jusqu'à la zone subéquatoriale, on peut définir quatre modes de gestion des eaux en fonction des conditions climatiques et de la perméabilité des sols. A chacun de ces modes correspondent des structures antiérosives et des techniques culturales particulières.

TABEAU 3 - Structures antiérosives et techniques culturales en fonction du mode de gestion des eaux de surface.

Modes de gestion	Structures	techniques culturales
AGRICULTURE SOUS IMPLUVIUM Zone aride à semi-aride	Impluvium, citerne Drain, digues sur les oueds Terrasses discontinues.	Labour, cuvettes, microbassins localisés.
INFILTRATION TOTALE Zone semi-aride ($P < 400$ mm) ou zone humide sur sol très perméable.	Fossés aveugles Terrasses radicales	Labour + billons cloisonnés Paillage.
DIVERSION Climat semi-humide, mois très humides. Sol peu perméable.	Fossés de diversion Banquette algérienne Terrasse radicale drainante.	Billons obliques ou dans le sens de la pente
DISSIPATION DE L'ENERGIE DU RUISSELLEMENT Tous climats, sols semi- perméables Pentes pas trop raides	Cordons ou murs de pierres Talus enherbés, lignes d'herbes Haies vives	Agroforesterie Labour motteux Cultures alternées/prairie Paillis.

Au Rwanda, il va falloir choisir le mode de gestion de l'eau :

- En tenant compte des besoins en eau pendant la saison sèche (Impluvium et citernes pour une irrigation d'appoint).
- En tenant compte 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).
- En tenant compte de l'épaisseur du sol et de sa capacité d'infiltration sans risque de glissements de terrain (fossés aveugles, terrasses radicales).

5.4 - Discussion sur les structures de gestion de l'eau adaptées au Rwanda.

Il nous semble important de montrer le rôle des structures "antiérosives" sur la gestion de l'eau, leur coût, leur intérêt, leurs limites et les variantes.

a) - Les citernes

Encore peu répandues au Rwanda, elles ont fait leur preuve dans des pays semblables comme Haïti, pour démarrer des pôles d'intensification de l'agriculture. Elles sont de deux types :

- les citernes d'eau potable collectant 10 à 50 m³ d'eau propre issue des toits de tôle ou d'impluviums domestiques. Elles réduisent les corvées eau et le déplacement du bétail, améliorent le niveau d'hygiène et la production du jardin autour des habitations,
- les citernes d'eau de ruissellement collectée sur les pistes, les versants rocheux ou sur les pâtures. Elles permettent l'abreuvement du bétail et l'irrigation d'appoint de cultures potagères et de jardins fruitiers de contre saison.

b) - Les fossés d'absorption totale ont pour objectif d'intercepter les eaux de ruissellement sur les versants perméables de moins de 20 % de pente pour améliorer l'alimentation des nappes et l'humidité disponible dans les couvertures pédologiques. Ils demandent beaucoup de travail à l'installation (350 hommes x jours) et à l'entretien (50 à 100 hommes x jour), mais n'augmentent pas beaucoup les rendements des cultures.

Ils ne réduisent pas la dégradation du sol par battance (érosion en nappe), mais participent à la formation de talus et de terrasses progressives.

Au bout de 5 à 10 ans, on peut les transformer en 2 terrasses radicales. Leur intérêt est de modifier progressivement le paysage et les besoins en fertilisants. Le risque est de transformer une érosion en rigole en une ravine (par débordement si les fossés ne sont pas curés régulièrement) ou en glissement de terrain (si la pente dépasse 35 %, si le sol est peu profond ou posé sur un plan de glissement : schistes, gneiss, lit micassé, dôme granitique recouvert de cendres volcaniques).

c) - Les microbarrages perméables : cordons d'herbes, haies vives, cordons de pierres ont pour objectif de ralentir les eaux de ruissellement, de dissiper leur énergie et de les étaler. Ils demandent moins de travail (50 hommes x jour plus 10 pour l'entretien), mais n'arrêtent pas le ruissellement et ne protègent pas complètement les terres labourées à l'aval. Ils ralentissent beaucoup l'érosion hydrique et bloquent l'érosion mécanique sèche. Ils aboutissent rapidement (20 à 30 cm par an) à un talus (de 1,5 à 2 mètres maximum) où s'accumule la terre fertile et un glacis décapé peu fertile qu'il faut restaurer. Au bout de 5 à 10 ans, on peut alors intervenir pour en faire deux terrasses radicales : l'une fertile à couvrir de plantes exigeantes et l'autre à restaurer pour produire des cultures moins exigeantes.

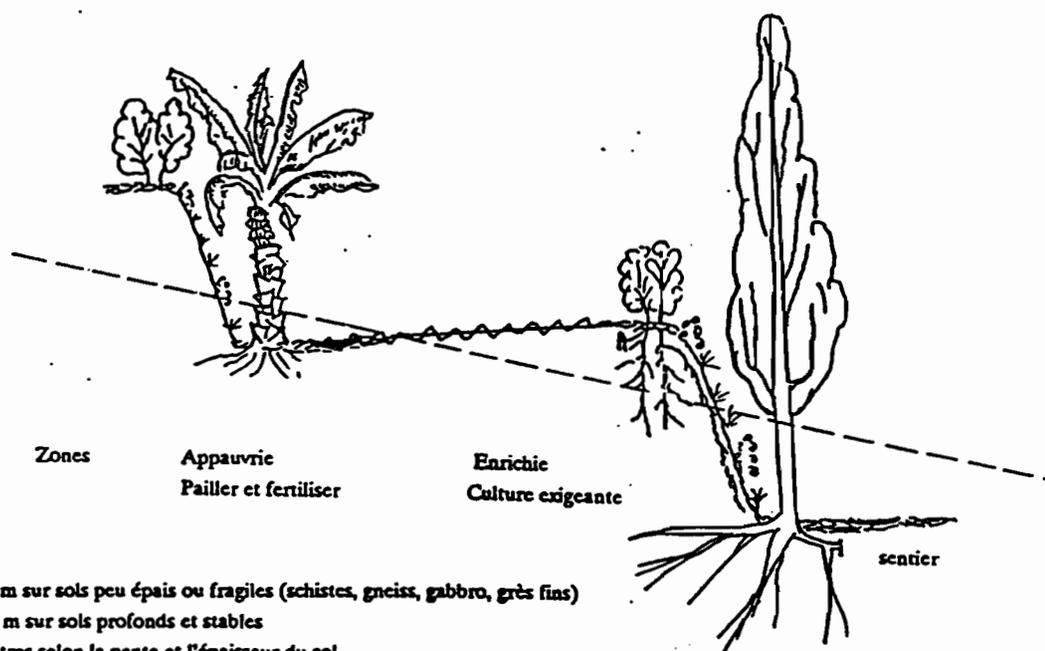
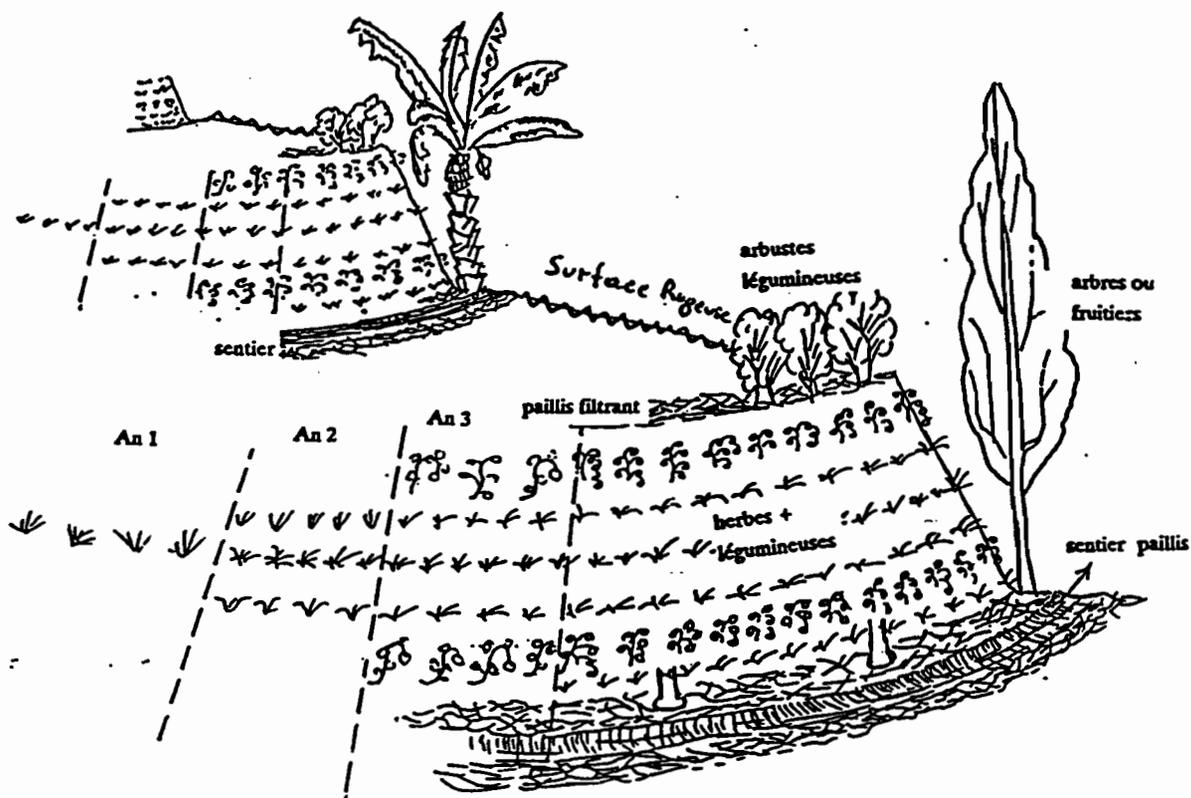
La figure 3 montre un schéma d'aménagement progressif d'un talus planté en herbes fourragères (mélange de graminées et de légumineuses), une haie vive de thé, de fruitiers, voir d'arbustes fourragers par dessus et une ligne d'arbres en aval pour restaurer le sol, stabiliser et dessécher la base du talus (anti-glissement). Une autre solution consiste à planter d'abord une ligne d'arbres fruitiers et ensuite de couvrir d'herbes le talus qui évolue par érosion mécanique sèche. Les différentes solutions vont dépendre de la profondeur du sol et de la nature du sous sol (perméable, pierreux, fissuré, riche en nutriments ou stérile).

d) - Les terrasses radicales ou gradins subhorizontaux ont pour objectif d'absorber toutes les eaux de pluie (plus le ruissellement si elles sont discontinues) et de capitaliser la fertilité qu'on y accumule. De légères modifications permettent de les irriguer (comme les rizières de Bali) ou de les drainer vers un exutoire aménagé (risque de ravinement). La largeur des terrasses cultivables dépend de la pente, de la profondeur du sol et du type de culture.

Les microterrasses en escalier (dH à peu près 50 cm, l = 50 à 100 cm) sont utilisées sur très fortes pentes (> 40 %) ou des sols superficiels pour des cultures de thé ou diverses associations des cultures alimentaires : elles exigent beaucoup moins de travail de terrassement et stabilisent bien les versants raides en cas de culture manuelle. Le terrassement classique exige 700 à 1200 hommes par jour à l'hectare en fonction de la largeur des bandes cultivées et de la pente.

Il est raisonnable de maintenir la hauteur des talus inférieure à 1,5 à 2 mètres sur les sols les plus stables pour assurer leur stabilité et la facilité de leur exploitation. Comme ces talus représentent 20 à 50 % de la surface des terres aménagées, il est indispensable d'intensifier leur production de

Figure 3 : Le modèle évolutif de structure antiérosive.



- Hauteur de talus limitée { à 1 m sur sols peu épais ou fragiles (schistes, gneiss, gabbro, grès fins)
à 2 m sur sols profonds et stables
- Distance entre talus : 5 à 20 mètres selon la pente et l'épaisseur du sol
- Talus incliné de $\approx 0,4$ m par mètre de hauteur, totalement planté en herbes fourragères 20 x 20 cm, enrichi en légumineuses rampantes dans les vides
- Exploitation de 2 à 4 coupes par an
- En amont :
 - . haie vive de légumineuses : Calliandra, Leucaena, etc...
 - . taille à 30 cm du sol 2 à 3 fois/an (biomasse 3 à 5 t/ha/an)
 - . pose au ras du sol d'une couche de paille filtrante
- En aval, à 1 mètre de la 1ère ligne d'herbe fixatrice, planter dans 1 trou > 70 cm des arbres tous les 4 m (Grevillea, Cedrella, Maesopsis, Casuarina, Bananiers, Avocats, Pêchers, Pruniers)
- Le sentier doit passer au pied du talus impérativement
- La biomasse produite peut servir :
 - . à l'affouragement du bétail
 - . au paillage léger du lit de semence en début de chaque saison = période la + dangereuse

fourrage par introduction de légumineuses (*Desmonium rampant*) et fertilisation sans quoi leur production baisse au bout de 3 ans et ne persistent que des adventices sans grand intérêt fourrager : ces talus fourragers vont permettre le maintien d'un élevage intensif en stabulation. Si on maintient la hauteur des talus inférieure à 2 mètres, la largeur des bandes cultivées est réduite lorsque la pente augmente. Les terrasses larges et la motorisation ne sont pas conseillées sur les pentes de plus de 30 % : les risques de glissement de terrains sont trop graves.

L'un des objectifs des terrasses radicales est de capitaliser la fertilité sans risque de voir le fumier et les engrais emportés par les eaux de ruissellement. Il faut toutefois savoir que si le ruissellement diminue, le drainage et le risque de lixiviation des engrais solubles N-K-Ca-Mg augmente, d'où la nécessité d'augmenter l'évapotranspiration (ETR) et d'intensifier la culture (cultures associées, succession rapide ou même tuilée de plantes à cycles courts), d'introduire des arbres capables de récupérer les solutions en profondeur et de gérer avec soin la fertilisation (voir plus loin fertilisation minérale associée au fumier et localisée sous les plantes).

Il devrait être clair que la terrasse radicale exige beaucoup de travail (mais finalement, pas plus que les fossés et leur entretien pendant 10 ans) et un investissement important pour restaurer la fertilité du sol (10 t de fumier, 3 t de chaux et N60 P60 K60) et l'entretenir. Par conséquent il faut prévoir la production d'un surplus et sa valorisation (routes praticables, organisation d'un marché et d'une commercialisation rémunératrice pour les paysans).

Enfin, on ne pourra aménager toutes les collines en terrasses radicales : les limites connues concernent l'épaisseur du sol (plus de 1,5 m), la pente (< à 60 %), la lithologie (schiste, gneiss et lits de micas, cendres volcaniques sur dôme granitique), la disponibilité en fumier, en chaux et en NPK, le financement et la formation des équipes de terrassiers. Il ne faudrait pas en faire le modèle unique, la panacée universelle sans quoi on court vers de nouvelles désillusions : d'autres modèles d'aménagement des collines existent qui sont plus progressifs, moins exigeants en travail et moins risqués, comme les microterrasses en escalier, les talus fourragers alliés à l'agroforesterie et au paillage, les vergers fruitiers avec couverture de légumineuses mieux adaptés à certaines circonstances fréquentes (paysans pauvres, sans bétail, donc sans fumier, très fortes pentes, sols trop superficiels ou trop caillouteux).

5.5 - Importance des techniques culturales

Les techniques culturales qui modifient l'état de la surface du sol, sa rugosité, sa couverture, le stockage et la concentration des eaux, sont souvent aussi efficaces sinon plus que les structures antiérosives pour réduire le volume du ruissellement et dissiper son énergie.

Si on peut conseiller d'adopter des structures simples, évolutives pour stabiliser les versants, il faut par contre tendre vers des systèmes de production complexes, des cultures associées, des jardins multiétagés où se multiplient les interactions positives entre l'amélioration de la production de la biomasse, la litière, les adventices, la couverture végétale et la protection des agrégats, l'activité de la mésofaune et la capacité d'infiltration du sol.

Le labour à plat en mottes grossières est indispensable si le sol est trop tassé : il augmente temporairement l'infiltration et dissipe l'énergie du ruissellement. Il améliore le stockage de l'eau dans le sol et la pluie d'imbibition, il aide à enfouir les résidus et à lutter contre les adventices. Malheureusement, il réduit la cohésion du matériau et augmente son érodibilité par les eaux de ruissellement, surtout s'il réduit trop finement les mottes.

Les buttes coniques accumulent localement de la bonne terre pour développer de gros tubercules, mais elles sont dangereuses car elles réduisent la cohésion du sol, augmentent la pente du sol soumis à la battance et concentrent les eaux en filets (érosion en rigole qui peut dégager les sables et les graviers).

Le billonnage parallèle à la pente a le même effet, il augmente le drainage et provoque des rigoles dès que les pluies ont encroûté les flancs des billons. Cependant, sur fortes pentes (> à 30 %), il réduit les risques d'érosion hydrique et de glissement lors des plus fortes averses.

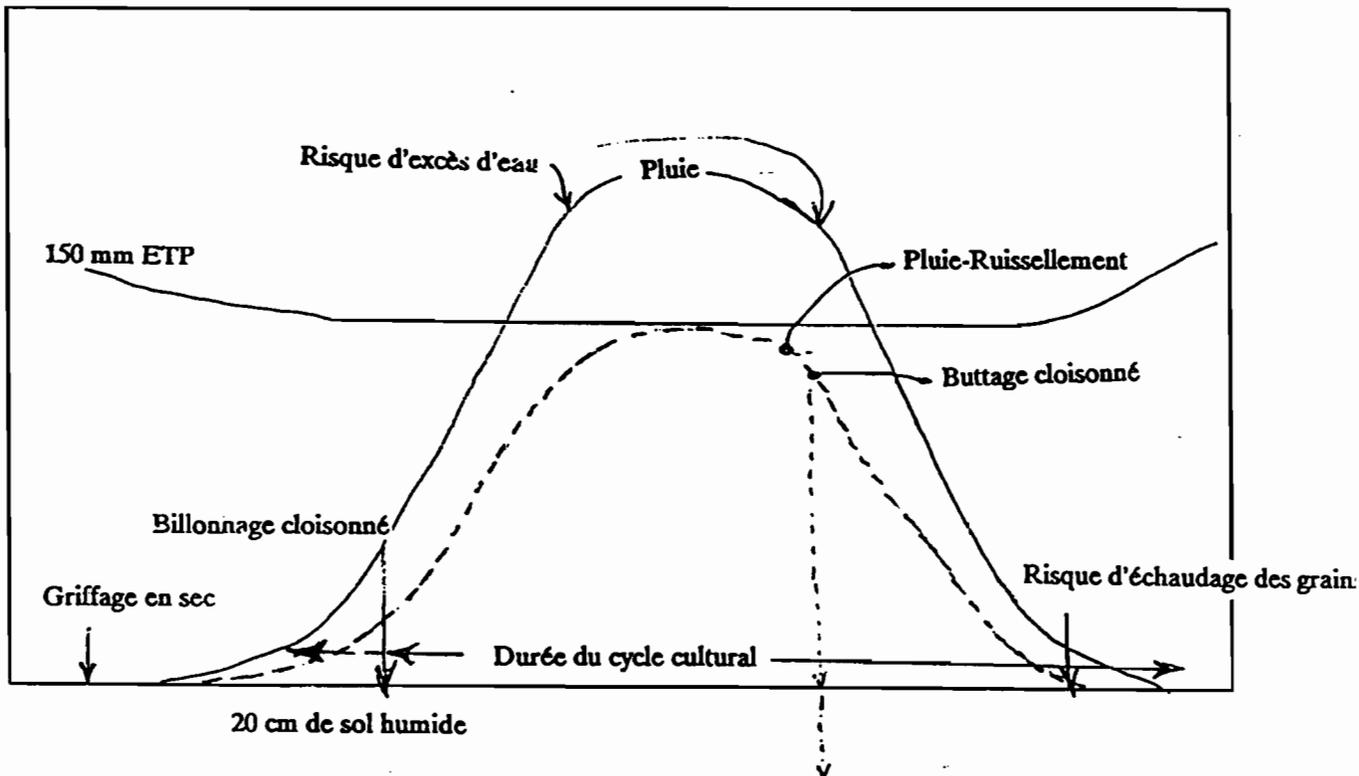
Le billonnage perpendiculaire à la pente améliore le stockage de l'eau lors des petites et moyennes averses, mais il peut donner lieu à du ravinement et des glissements lors des plus fortes averses si les eaux débordent la crête d'un billon mal couvert. Pour éviter ces inconvénients, il faut créer de gros billons (H = L = 40 cm) complètement protégés par une végétalisation rampante toute l'année (ex : patates douces) à

moins de 5 mètres d'écartement pour casser l'énergie du ruissellement sur les versants. Cette technique peut être associée aux haies vives tous les 10 mètres et aboutir à un petit talus intermédiaire sur les sols peu profonds.

Le billonnage légèrement incliné et cloisonné peut être un bon compromis pour stocker une certaine lame d'eau (60 à 30 mm selon la pente, 1 à 30 %) et drainer les eaux excédentaires sans autre érosion que celle des particules fines en suspension.

Cette technique du billonnage ou du buttage cloisonné est très efficace sur les faibles pentes des paysages de savane soudano-sahéliennes.

Il est possible de raisonner le choix des techniques culturales en fonction des risques d'excès ou de manque d'eau dans le sol. (fig. 4).



Labour grossier et billonnage cloisonné

si l'on veut allonger le cycle
et produire le maximum de biomasse.

Buttage cloisonné après
2 sarclages si on veut
augmenter le stock
d'eau dans le sol pour
remplir les grains :
stabilité de la
production.

- Si la durée de l'hivernage est trop brève, on peut déjà soussoler le sol en sec ($h > 12$ cm) pour améliorer l'infiltration sur les lignes de plantation et semer très tôt dans la raie: d'où allongement du cycle.
- 1 mois plus tard, on peut labourer et construire des billons cloisonnés pour stocker le maximum d'eau et produire beaucoup de biomasse... qui risque d'être échaudée si la saison des pluies s'arrête trop vite.
- Mais si on craint des excès d'eau pendant quelques semaines, après labour et 2 sarclages, on peut faire un buttage cloisonné qui va permettre de stocker l'eau dans le profil en fin de saison et éviter l'échauffement des grains.

6. La gestion de la fertilité

En dehors de la zone volcanique où les cendres donnent des horizons poreux mais peu acides, la majorité des sols ferrallitiques du Rwanda sont très acides avec parfois développement d'une toxicité aluminique, ce qui augure d'un fort drainage et de risques élevés de lixiviation, risque encore augmenté si l'on supprime le ruissellement. Il ne suffit donc pas de "conserver le sol" ni même de supprimer le ruissellement, il faut en plus restaurer et améliorer la fertilité de ces sols.

La CES n'est plus acceptée par les paysans car elle ne valorise pas leur travail. Pourquoi protéger le sol en creusant des fossés si malgré le travail supplémentaire, la récolte n'est pas significativement meilleure ?

6.1. Restauration de la fertilité des sols

La restauration d'un sol dégradé comprend six étapes complémentaires pour arriver rapidement (un à deux ans) à une production intéressante. Si l'on laisse faire la nature (jachère) ou si on néglige l'une des composantes, le temps nécessaire à la restauration se prolonge. Cette restauration peut prendre des siècles si le sol est décapé jusqu'à la roche.

Un sol dégradé est généralement décapé, tassé, instable, stérile, acide et/ou carencé et sujet à un ruissellement intense. Il va donc falloir remédier à chacun de ces défauts dans l'ordre suivant :

- 1 Maîtrise du ruissellement et de l'érosion : mise au point d'un système de production durable couvrant bien le sol avec si nécessaire des structures antiérosives simples ;
- 2 Travail profond du sol pour recréer un bon drainage;
- 3 Stabilisation de la macroporosité et de la structure par enfouissement des résidus organiques (ou de gypse) et par une culture produisant beaucoup de biomasse racinaire (engrais verts, légumineuses, sorgho) ;
- 4 Revitalisation du sol par apport de 10 à 20 t/ha de fumier ou compost à mélanger à la couche superficielle du nouveau sol ;
- 5 Chaulage (1 à 5 t/ha) pour remonter le pH à plus de 4,8 - 5 où la toxicité Al + Mn disparaît ;
- 6 Correction progressive des carences en alimentant les plantes cultivées à leur rythme et en "emballant" le complément minéral dans la fumure organique pour éviter sa lixiviation ou son insolubilisation par le fer ou l'aluminium libres.

6.2. Entretien de la fertilité du sol en milieu filtrant acide

- Une fois l'érosion maîtrisée et la fertilité physique, biologique, chimique restaurée, il reste à nourrir les plantes cultivées (localisation de la fumure) à leurs rythmes (doses fractionnées) en fonction des objectifs de production (N 40 à 160 kg/ha ; P 30 à 100 ; K 20 à 100) et des risques de lixiviation périodiques (chauler après les périodes les plus pluvieuses).

En pratique, il faut gérer au mieux les résidus organiques et ajouter les compléments minéraux nécessaires pour équilibrer le bilan des pertes (exportation des récoltes, lixiviation, érosion, dénitrification ou insolubilisation).

- RUTUNGA (1991) constate que sur les terres pauvres le chaulage doit être renouvelé tous les trois ans et la fumure organique (10 t de fumier) tous les trois cycles culturaux. Sur les terres moyennement riches, le chaulage n'est guère utile mais bien la fumure organique et minérale. Sur les terres volcaniques riches, de faibles doses de NPK n'entraînent jusqu'ici que de faibles différences de

rendement.

- En outre, chaque plante présente ses exigences propres :

	N	P	K	
Haricot	34	25 - 50	34	en fonction des maladies cryptogamiques
Soja	20 - 40	40 - 50	30 - 50	+ inoculum + chaux si pH < 5
Pois	34	34	34	+ inoculum + chaux + fumier
Arachide	30	30	0	
Sorgho	60	60	17	en altitude + fumier (+chaux)
Maïs	78	42	42	
Blé	88	42	42	
Riz irrigué	60	30	30	pour 2 tonnes de paddy
	100	60	60	pour 6 tonnes de paddy
Pommes de terre	51	100	200	+ chaux + fumier si en altitude
Manioc	100	50	100	
Maraîchage	30 - 50	30 - 70	100 - 200	ou 35 tonnes de fumier

6.3. Gestion de la biomasse

Au Rwanda, les paysans sont généralement trop pauvres pour acquérir les engrais minéraux nécessaires à l'intensification de leur production. Ils ne disposent que de la gestion de la biomasse produite (adventices, résidus de culture, herbes broutées le long des chemins et sur les terres communales, feuilles d'arbres composant la litière des bêtes, cendre et déchets familiaux). Avant leur recyclage dans le sol, cette biomasse et les minéraux contenus vont subir une série plus ou moins longue de valorisation et transformations qui vont influencer fortement sur les restitutions au sol.

- a) Valorisation par l'élevage : filière longue (3 à 6 mois avant la maturité du fumier) permettant la production de lait, de viande, de peaux et de fumier. Le rendement de restitution en biomasse et nutriment est faible (30 à 40 %) mais la matière organique est de meilleure qualité (C/N = 20 pour le fumier, 60 pour la paille et 10 pour l'humus du sol).
- Le fumier apporte aussi la microflore indispensable pour mobiliser le stock minéral du sol et le rendre assimilable par la plante.
 - Les apports à la tonne de fumier (25 % d'eau) sont variables : par exemple 4 kg de N, 15 kg de P, 12 kg de K, 19 kg de Mg et 25 kg de Ca (Rutunga, 1991). Avec 20 tonnes de fumier de ce type on arrive à améliorer le statut organique du sol mais aussi à nourrir la plupart des cultures. On remarque le très mauvais rendement en azote, car il s'agit en fait de poudrettes exposées au soleil plutôt que d'un vrai fumier fermenté avec une litière suffisante pour fixer l'azote des déjections liquides.
 - Le fumier suffit à peine pour entretenir le tiers de la surface de l'exploitation s'il n'y a pas de terres communales ou de compléments industriels. Le reste des terres continue à s'appauvrir en portant de maigres cultures de manioc et de patates douces tolérantes à l'acidité des sols pauvres.
 - Il apparaît donc nécessaire d'augmenter le volume de fumier produit et sa qualité par l'amélioration de l'élevage (semi stabulation sur une litière plus abondante).
 - Avec la pression démographique et la réduction de la surface moyenne des exploitations (0,4 ha par famille en l'an 2000 !), le gros bétail va se retirer vers les hautes montagnes et les savanes.

Il ne restera plus que les chèvres, le petit bétail et les porcs susceptibles de continuer à fournir un fumier de bonne qualité à partir de l'ensemble des résidus.

b) **Compostage** : C'est une filière encore plus longue (6 à 18 mois) dont les rendements sont aussi faibles que pour le fumier mais qui ne produit pas de viande. C'est pourtant une pratique valable pour ceux qui ne possèdent pas d'élevage (paysans pauvres) ou qui disposent de grandes quantités de déchets industriels (parche de café, gadoues de ville, drèches de brasserie etc). Mais l'obstacle majeur est le travail nécessaire. On a essayé de creuser les compostières aux champs pour éviter le transport : mais elles restent vides. Les seules fosses efficaces sont les compostières - fumières - poubelles où sont tassés tous les résidus disponibles, en même temps que les cendres. Pour que le mélange fermente avec moins de perte, on préconise des fosses petites (4 x 2 m) plantées d'arbres qui fournissent l'ombrage, une ambiance fraîche et humide, de la biomasse riche en minéraux et dont les racines récupèrent les solutions lessivées du tas par les eaux de drainage. Comme on ne peut en produire que 5 t/an par famille (soit 0,2 à 0,5 ha par exploitation), il faut encore trouver des solutions complémentaires pour fumer l'ensemble de l'exploitation, mais c'est une bonne base pour démarrer des cultures maraîchères lesquelles permettent le décollage du développement rural (voir Haïti).

c) **L'enfouissement des résidus et des adventices** :

On ignore souvent la masse de résidus de culture, de racines et surtout des adventices que les paysans enfouissent lors des labours et sarclages. C'est pourtant une filière courte (1-3 mois) qui permet un turn over rapide des nutriments contenus dans la biomasse.

Il existe d'ailleurs diverses méthodes traditionnelles où l'on rassemble en tas les adventices pour les faire sécher, puis on les recouvre d'une butte de terre que l'on plante aussitôt de boutures de patates douces. A la récolte de celles-ci, la terre riche en matières organiques est répandue alentours. Ces enfouissements répétés dans l'année de matières organiques fraîches permettent de maintenir un certain niveau de carbone organique dans le sol mais leur action sur la fertilité du sol et sur sa résistance à l'érosion est très limitée.

D'une part le paysan exploite de plus en plus cette biomasse pour l'élevage des animaux puisque les jachères disparaissent et d'autre part l'élévation de 1 % du taux de matière organique du sol ne réduit que de 5 % l'érodibilité du sol (d'après le Nomographe de Wischmeier, Johnson et Cross, 1972). Or il faut des apports considérables de matière organique évoluée pour augmenter de 1 % le taux de carbone de 10 cm de sol (1 % de 1500 tonnes de terre). L'enfouissement brutal de 15 tonnes de paille peu évoluée entraîne une faim d'azote fixée par la masse microbienne.

d) **Le paillage épais (7 - 10 cm = 20 à 25 t/ha)** est une méthode très efficace pour réduire l'évaporation, la croissance des adventices, maintenir l'humidité du sol en saison sèche et arrêter l'érosion.

C'est aussi une filière courte pour restituer la totalité de la biomasse et les nutriments qui la constituent (K, Ca, Mg, C d'abord par lessivage, N et P à mesure de la minéralisation et de l'humification à travers la méso et microfaune). La disparition de la litière est 30 % plus lente posée en surface, qu'enfouie par le labour, mais les risques de "faim d'azote" sont moins graves. Sous forêt, où les sols sont souvent les meilleurs, la litière n'est jamais enfouie par labour... mais par les vers, et souvent les termites et autre mésofaune : les sols non dégradés sont tout à fait capables d'ingérer les matières organiques déposées à leur surface.

Sous caféiers et bananiers, le paillage a fait ses preuves ce sont les parcelles les moins érodées et les moins dégradées des collines cultivées depuis longtemps. Malheureusement, on ne dispose pas de masse suffisantes de résidus végétaux pour couvrir totalement les terres cultivées. Mais un paillage léger (2 à 6 t/ha) répandu en début de saison des pluies dissipe l'énergie des gouttes

de pluie et celle du ruissellement et maintient plus longtemps une bonne infiltration en même temps qu'une forte activité de la mésofaune. Même s'il ne couvre que 50 % de la surface du sol, il réduit de 80 % les risques d'érosion. Sur sol encroûté, il réduit bien l'érosion mais moins le ruissellement. Mais de toute façon il apporte des éléments nutritifs ainsi que des matières organiques fraîches à la surface du sol qui améliorent sa structure, là où le sol est attaqué par les pluies.

Aucune de ces méthodes de recyclage n'est parfaite ; elles doivent être combinées pour profiter de toutes les opportunités.

Aussi avons nous tenté de modéliser une exploitation type de un hectare pour comprendre les interactions souhaitables entre l'agriculture, l'élevage et l'introduction d'arbres et d'arbustes pour réaliser une sorte de bocage.

6.4. Essai de modélisation d'une exploitation d'un hectare

Cet exercice nous permettra de voir le rôle joué par chaque parcelle dans l'équilibre nutritionnel de l'exploitation type.

		fourrage tonne	paillis tonne
soit	30 ares de bananier* (3,3 t/ha de stipes + 2,6 t feuilles)	+1	+0,8
	10 ares de café** exigeant 20 t/ha/an de paillis	0	-2
	10 ares de manioc continu produit des tiges	0	+1
	20 ares de haricots purs	0,4	0
	/ sorgho en seconde saison (5 t/ha de tiges)	0	1
	10 ares de maïs/soja ou arachide en seconde saison	+0,5	+0,1
	10 ares de haies vives tous les 10 mètres (5 kg x 1000 m)	5	0
	10 ares de talus enherbé	0	1
	Production totale en matière sèche /ha/an	6,9	3,9-2 = 1,9

* Selon MARCHAL J. et GODEFROY J. du Cirad-IRFA, un bananier donne 6 à 8 kg de matière sèche (56 % de stipes et 44 % de feuilles) ou 80 à 100 kg de matières fraîches (81 % de stipes et 19 % de feuilles). Si la densité de bananiers est de 1111 pieds/ha, et la durée du cycle à Rubono (1500 m d'altitude) de 16 mois, une bananeraie produit 3,3 t/ha de stipes et 2,6 t/ha de feuilles sèches (communication orale).

** Selon JAUDIN de l'IFCC 20 t/ha/an de Pennisetum ou encore selon GAIE & FLEMALLE (1988) une épaisseur de 10 cm.

- Une vache a besoin de 0,4 ha de Pennisetum soit environ 8 tonnes de fourrages
 " " donne $8 \times 0,3 = 2,4$ tonnes/ha de fumier soit de quoi entretenir 10 à 20 ares.
 la biomasse disponible pour le paillage est de $3,9-2 = 1,9$ t soit un paillage léger par an.

D'où l'intérêt de l'agroforesterie pour stabiliser l'exploitation : sur 50 ares x 200 arbres/ha = 100 arbres x 50 kg de paillis = 5 tonnes de paillis ou haies vives tous les 5 mètres x 4 kg / mètre linéaire sur 0,5 ha = 4 tonnes de paillis ou de fourrage. Ce qui permet deux paillages légers par an, en particulier lors de la seconde saison des pluies (la plus dangereuse pour l'érosion car le sol est déjà humide) et un volant de fourrage de réserve pour le bétail en particulier en saison sèche.

Noter également la forte consommation de paillis par les caféiers qui pourrait être remplacé par des haies de *Leucaena diversifolia* taillées avant la saison sèche pour pailler les caféiers.

6.5. Conclusions partielles

Pour conclure ce chapitre sur la gestion de la fertilité il semble important de souligner

- 1 Le besoin de recherche sur la gestion des nutriments à travers la gestion de la biomasse et l'accélération de turn over par le paillage ;
- 2 La nécessité d'intensifier l'agroforesterie, y compris là où l'on opte pour les aménagements en terrasses radicales ;
- 3 Ces sols acides nécessitent des apports minéraux : le chaulage et les phosphates qu'on ne peut trouver dans la biomasse végétale. On devrait mieux exploiter la biomasse animale (poudre d'os, de sang) ;
- 4 K et Mg ne viennent à manquer que si l'on intensifie la production et pour les plantes à tubercules (en particulier la pomme de terre) mais on peut les trouver dans les cendres ménagères et le fumier composté ;
- 5 Une bonne partie de l'azote pourrait provenir de cultures dérobées de légumineuses durant 6 mois.... à condition qu'elles trouvent assez de phosphore et un pH > 5,2 pour qu'elles soient capables de fixer l'azote de l'air. Il est donc urgent d'organiser un marché des engrais ;
- 6 Il est impossible de supprimer l'élevage car il valorise les biomasses dispersées sur les chemins et les talus et maintient la santé des populations. Cependant le bétail ne peut circuler sur les zones aménagées en terrasse. Il faut donc favoriser la stabulation pendant la majorité de la journée et toute la nuit....ce qui permettrait d'améliorer la fixation de l'azote, la quantité et la qualité de fumier.

7. Quelques aspects économiques de l'érosion

- Une analyse même succincte des problèmes économiques posés par l'érosion permet d'avoir une meilleure compréhension de l'importance de la stratégie à mettre en oeuvre si on veut réduire les transports solides et les incidences de l'érosion à l'aval ou si on veut réduire la dégradation du sol sur les champs des paysans.

7.1. Le coût à l'aval ou sur le site d'érosion

Il faut d'abord bien distinguer

- . Le coût de l'érosion à l'aval : pollution des eaux, envasement des barrages, boues colmatant les fossés, les routes, les villes, inondations, glissements de terrain, augmentation des débits de crues emportant les ponts et dégradant les berges, dépôts de sables stériles dans les vallées où on tente la valorisation des marécages. Le coût est énorme et attire généralement l'attention des pouvoirs publics nationaux et internationaux.

Le coût de l'érosion sur le site où il se développe :

- perte d'eau (assèchement de la terre) ;
- perte de nutriments (dégradation du sol)
- perte de surface cultivable (si ravinement) et enfin à plus long terme,
- perte du potentiel de production : décapage de l'horizon humifère, stérilisation, perte du stockage de l'eau et des nutriments dans le sol.

Ainsi on peut voir fig. 5 courbe 1 que l'érosion cumulée sur un sol brun sur loess profond ne change guère sa productivité. Avec les engrais, la motorisation, les herbicides et les graines sélectionnées, la production n'a pas baissé mais augmenté depuis un siècle, que ce soit en France ou aux USA. Il existe aussi des sols peu fertiles qu'ils soient soumis à l'érosion ou pas car ils sont déjà dégradés depuis longtemps (courbe 2). Par contre, certains sols tropicaux, en particulier les sols forestiers où la fertilité est concentrée dans les horizons superficiels, ou qui ont un horizon latéritique en profondeur, perdent très vite leur productivité en même temps que l'horizon humifère (voir courbe 3).

7.2. Impact des différentes stratégies

Si donc on dispose d'un paquet limité de dollars, où vaut-il mieux les investir ?

En 1, cet investissement n'améliore pas les rendements, n'intéresse pas les paysans mais seulement les gens de l'AVAL qui ont besoin d'eau propre.

En 2, le cas est semblable

Il s'agit donc de stratégies d'équipement (RTM-DRS) qui s'intéressent d'avantage à l'amélioration de la qualité des eaux qu'au potentiel de production des terres. Les chantiers s'installent sur les terres dégradées et investissent généralement de grosses sommes sur de petites surfaces d'où proviennent beaucoup de sédiments.

En 3 par contre, il s'agit de terres en production qui se dégradent rapidement mais peuvent se restaurer presque aussi rapidement. L'investissement (fertilisation, travail du sol et structures légères, agroforesterie) est étalé sur les terres cultivées pleines d'avenir et permettent le développement d'une agriculture intensive. Ce projet de type G.CES intéresse d'avantage les paysans qui constatent l'augmentation rapide des rendements et la valorisation de leur travail, mais relativement moins l'aval car cet investissement réduit peu les sédiments et les chantiers sont trop dispersés (et pas assez spectaculaires pour les bailleurs de fonds).

Il serait très utile de lancer un projet de recherche sur l'effet du décapage des sols par l'érosion ou par terrassement sur les potentialités de production des sols des collines rwandaises et sur la possibilité et le coût des intrants nécessaires pour restaurer leur fertilité.

7.3. Le coût de la lutte antiérosive

Un autre élément de choix entre les différentes techniques antiérosives est son coût.

Les temps de travaux à l'installation des structures (50 à 1200 hommes x jour/ha) et à l'entretien (5 à 350 hommes x jour/ha) varient énormément.

Certains paysans préfèrent étaler les travaux d'aménagement sur 10 ans (terrasses progressives) et d'autres voudront les réaliser rapidement pour en profiter pleinement de suite (terrasses radicales). Certains (des commerçants) pourront investir énormément en une fois en terrassant et en fertilisant (une terrasse radicale représente environ 1000 hommes x jour + 10 t de fumier + 3 t de chaux + 300 kg NPK + semences de pommes de terre + pesticides). Tandis que les paysans pauvres ramassent toute l'année du paillage (350 hommes x jour chaque année) pour protéger et fertiliser leurs terres. Les petits paysans jouent à la fois sur l'élevage de quelques bêtes permettant la fertilisation de quelques ares et l'aménagement de lignes d'herbes évoluant en talus fourragers et en terrasses progressives.

Qui va payer le coût du terrassement et celui des fertilisants ?

Les groupements paysans peuvent investir leur travail mais disposent-ils d'argent pour acheter les engrais nécessaires, les graines sélectionnées, les pesticides et les herbicides ? L'Etat et les projets doivent financer le démarrage de l'intensification de l'agriculture ainsi que l'organisation des marchés : ensuite les groupements paysans devraient pouvoir s'autofinancer... à condition que les aménagements (LAE + restauration de la fertilité) entraînent réellement une augmentation de la productivité.

En conclusion, il faudrait éclairer les paysans sur les conséquences de l'érosion et leur laisser choisir parmi une palette de solutions adaptées aux conditions écologiques et socio-économiques qui leur conviennent.

La difficulté viendra du passage de l'aménagement des parcelles dispersées à l'aménagement d'un versant ou d'un bassin versant valorisés par une communauté paysanne peu homogène.

8. Conclusions générales

8.1. La lutte contre le ruissellement et l'érosion est plus complexe que prévue. D'une part les processus de dégradation des sols sont nombreux et le référentiel technique est bien loin d'être adapté à la diversité écologique du Rwanda. D'autre part les implications sociologiques et économiques sont nombreuses : les problèmes fonciers, objectifs et priorités des paysans, disponibilité en terre, travail, élevage et intrants divers, possibilités de valoriser les produits et d'améliorer le niveau de vie...

8.2. La conservation des sols ne peut satisfaire les paysans car elle ne valorise pas immédiatement leur travail. La majorité des terres sont déjà si pauvres que même si on maîtrise correctement les pertes par érosion, la productivité des terres et du travail reste médiocre. Or la population double tous les quinze ans ! Le défi à relever est de doubler la production en 10 ans pour rattraper la progression géométrique de la population. La conservation des sols ne suffit pas, il faut en restaurer la fertilité pour valoriser de suite le travail investi. La G.CES vise d'abord l'augmentation nette des rendements tout en stabilisant le milieu.

8.3. C'est pourquoi la G.CES passe par la gestion de l'eau et par la fertilisation pour créer des points d'intensification et de développement du milieu rural par l'élevage (car le fumier est l'une des clés sur ces sols ferrallitiques passeroies) et par l'agroforesterie. La G.CES vise d'abord l'augmentation significative des rendements ce qui exige la stabilisation du milieu : la LAE n'est plus le drapeau autour duquel on tente de rallier l'opinion publique... Ce n'est qu'un passage obligé.

8.4. On peut distinguer différents niveaux de recommandations :

- C'est aux groupements paysans qu'il revient de devoir maintenir et si possible améliorer l'environnement rural en gérant l'eau (stockage, irrigation d'appoint durant la troisième saison culturale) et la fertilité de son terroir bien à l'abri sous une épaisse biomasse (jardin multiétagé).

- Mais la vulgarisation des nouvelles techniques, la lutte contre le ravinement et les glissements de terrains provenant des rivières torrentielles ou du réseau routier revient aux Services Régionaux.

- Quant à l'Etat, il est responsable de la stratégie adoptée et de la formation, de la sensibilisation depuis l'école primaire jusqu'à l'université.

8.5. La recherche doit encore préciser certains processus (érosion mécanique sèche, glissements) les techniques de LAE à mettre en oeuvre en fonction du diagnostic de l'origine du ruissellement, le bilan des pertes par érosion, le suivi des aménagements et le coût économique de la lutte antiérosive.

On a beaucoup moins de données sur l'importance de l'érosion sur la production où il ne s'agit que d'impacts moyens à l'échelle d'une région, qui peuvent être corrigés facilement par l'augmentation d'intrants.

- La C.E.S. est justement une stratégie qui visait d'abord la conservation de la qualité des eaux (surtout utilisée par l'industrie et les citadins) et par la même occasion la conservation du potentiel de production des sols. Or l'impact de l'érosion sur ce potentiel de production du sol dépend beaucoup du type de sol, de son épaisseur, de la succession de ses horizons, de la présence cailloux (roches réduisant son aptitude à l'exploitation motorisée, de la concentration de sa fertilité en surface, comme les sols forestiers tropicaux). voir fig. 5

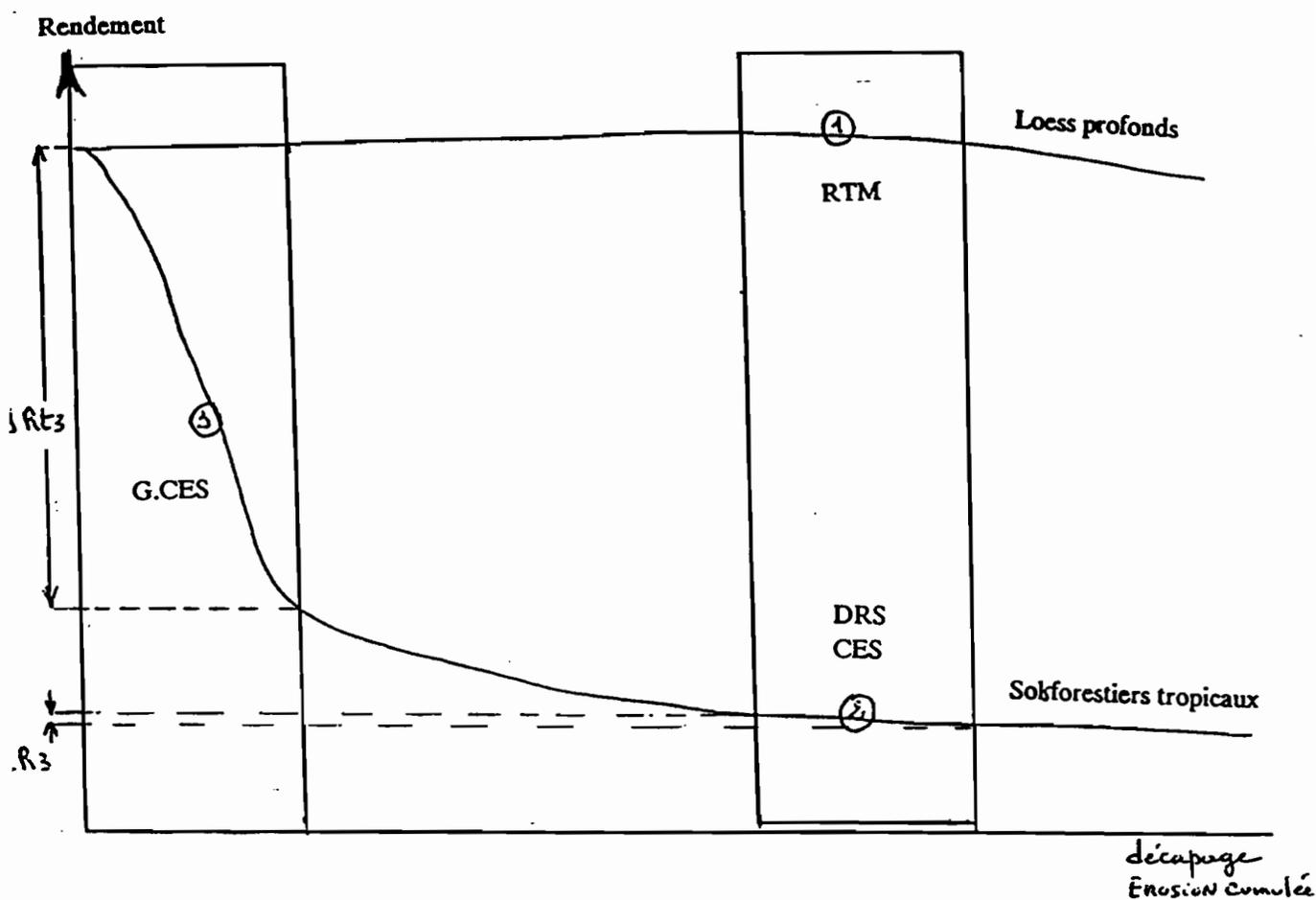


Fig. 5 - Effet de l'érosion cumulée ou du décapage du sol sur leur potentiel de production. Intérêt des stratégies d'équipement rural (RTM - DRS - CES) et de développement rural (G.CES) face aux situations pédologiques.

Dégradation et restauration accélérée des sols : exemple d'une méthode traditionnelle Mossi de restauration des sols au Burkina Faso

par Eric Roose, pédologue au Centre ORSTOM de Montpellier

* La dégradation de la productivité des sols peut provenir de nombreux processus : minéralisation du stock de M.O. du sol non équilibré par les apports de M.O. fraîche, érosion sélective ou décapage, compaction, salinisation, etc...

* Suite au défrichage et à la culture des terres tropicales, on observe :

1. une perte de diversité de la végétation entraînant une réduction de la profondeur exploitée par les racines, de la productivité végétale et des remontées biologiques ;
2. une réduction de la protection du sol contre l'énergie du soleil et des gouttes de pluie, en particulier au niveau de la litière. D'où, un assèchement du microclimat.
3. une diminution des matières organiques du sol entraînant une réduction des activités des micro- et méso-faunes, une réduction de la macroporosité, de la capacité d'infiltration et de la stabilité structurale ;
4. une augmentation des risques de ruissellement, d'érosion et de lixiviation des nutriments. L'érosion n'est pas la cause première de la dégradation des sols mais elle accélère le déséquilibre.

* Pour restaurer la productivité des sols dans les plus brefs délais, il faut donc compenser ces déséquilibres et respecter simultanément les 6 règles suivantes :

1. maîtriser le ruissellement et l'érosion ;
2. recréer une macroporosité continue dans le profil (sous-solage mécanique ou biologique) ;
3. stabiliser cette macroporosité (Matière Organique, chaulage, gypse et culture à forte production racinaire) ;
4. revitaliser l'horizon de surface par apport de M.O. fermentée (fumier ou compost de 3 à 10 t/ha) ;
5. remonter le pH au-dessus de 5 pour éliminer la toxicité aluminique ;
6. corriger les carences du sol (difficile) ou tout au moins assurer l'alimentation équilibrée des plantes cultivées.

* Le Zaï, méthode traditionnelle Mossi du plateau central du Burkina existe aussi au Mali (pays Dogon) et au Niger (Reij). Cette technique consiste à récupérer les terres dégradées (Zipellé = glacis blanchis désertifiés, encroutés) en les protégeant par un réseau de cordons de pierres, en creusant en saison sèche des cuvettes qui collectent les eaux pluviales sur 1/3 de la surface cultivée et en y concentrant la fertilisation organique (2 à 3 t/ha de poudrette). Les matières organiques attirent des termites (*Trinervitermes*), lesquelles redistribuent en profondeur par leurs galeries les nutriments et l'eau disponible. L'amélioration de cette méthode (mécanisation, complément minéral, maintien des repousses forestières) permet d'assurer dès la première année une production raisonnable (800 à 1500 kg/ha/an de mil ou sorgho) et durables en même temps qu'une revégétalisation des zones soudano-sahéliennes (Pluie de 400 à 800 mm). Voir schéma.

Introduction

Au rythme actuel de la dégradation (10 millions d'hectares par an d'après la FAO), il faudrait trois siècles pour détruire l'ensemble des terres actuellement cultivées. Face à ces problèmes de dégradation, que ce soit dans les pays développés ou dans les pays sous-développés, on trouve deux attitudes : soit l'attitude des écologistes qui consiste à tenter de conserver la végétation, les animaux et les sols dans des parcs protégés, soit l'attitude des développeurs qui cherchent à intensifier l'agriculture par la mise au point de systèmes de production durables.

Pour introduire ce thème de dégradation et de restauration des sols, nous allons nous poser quatre questions.

Première question . Pourquoi les sols cultivés se dégradent-ils? Quel est le rôle de la minéralisation des matières organiques du sol et celui des différents types d'érosion dans la vitesse de dégradation des sols?

Deuxième question Les sols dégradés sont-ils définitivement perdus ou sont-ils récupérables dans certaines conditions? Le sol est-il une ressource non renouvelable ?

Troisième question . Dans les milieux traditionnels comment s'y prennent les paysans ? A cette occasion nous allons présenter l'exemple du ZAI, méthode traditionnelle Mossi développée sur le plateau central du Burkina Faso.

Quatrième question . La dégradation des sols tropicaux est-elle inéluctable a cause de la croissance démographique? ? Les relations entre la dégradation des sols et la pression démographique n'est pas linéaire, il existe des seuils permettant de changer de système de production .

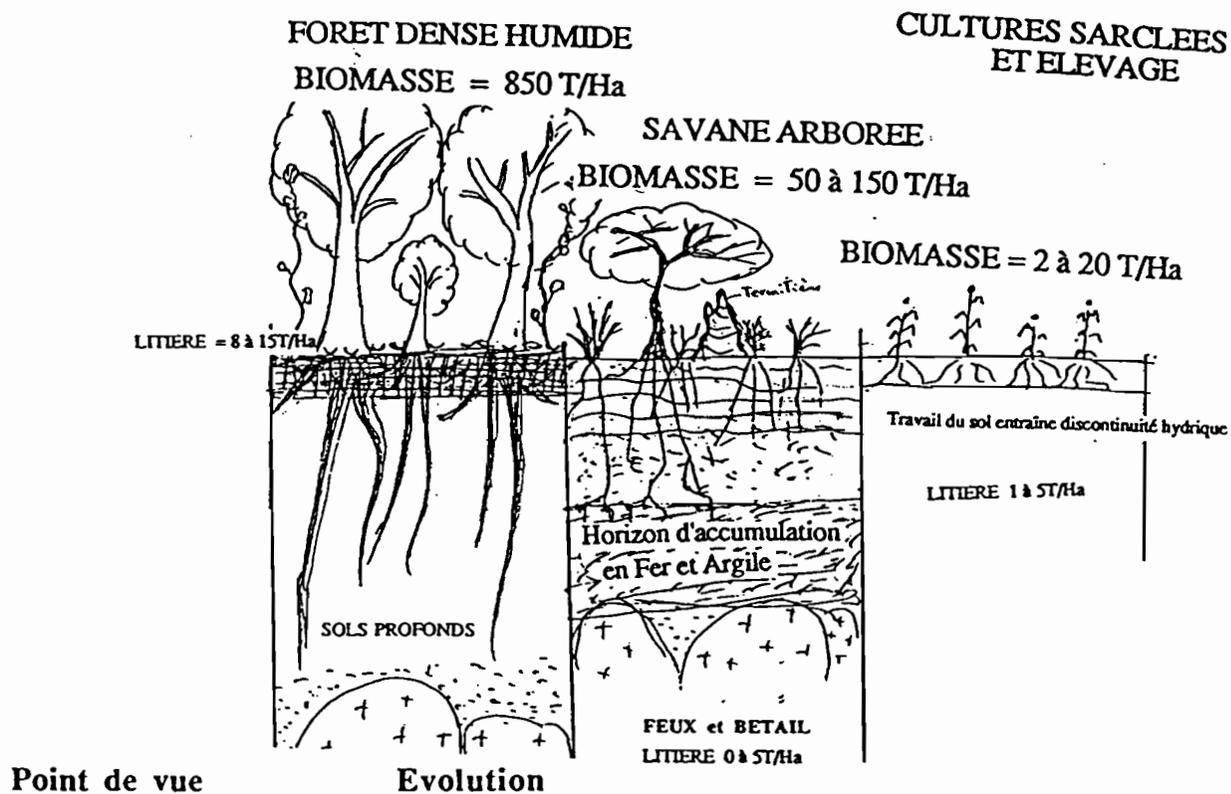
En conclusion nous n'évoquerons pas une position catastrophiste face à ce grave problème de la dégradation accélérée des terres, mais nous tenterons d'indiquer un certain nombre de pistes d'espoir.

1 Les causes fondamentales de la dégradation des sols.

A la figure 1, on peut constater la nature du problème : il s'agit du déséquilibre du milieu aménagé.

En milieu forestier, on observe que la biomasse est très importante, 850 tonnes à l'hectare, que la litière qui tombe au sol et le recouvre atteint 8 à 15 tonnes par hectare et par an, que l'horizon humifère est riche mais superficiel, que les racines descendent profondément dans le profil. L'ensemble des profils étant généralement altérés sur de grandes profondeurs, il n'est pas rare de trouver des sols de 10 à 20 mètres de profondeurs. On constate que la surface du sol est parfaitement protégée à la fois par la canopée des arbres, par le sous-étage arbustif et enfin par la litière.

FIG. 1. NATURE DES PROBLEMES : LE DESEQUILIBRE DU MILEU "AMENAGE"



- Végétal
 - Simplification de l'écosystème ----> biomasse ↘
 - Protection du milieu > < E soleil + pluie ↘

- Climat Réchauffement température --> assèchement du milieu

- Sol
 - épaisseur de sol exploité ----> Réduction remontées biologiques
 - apports de litière {
 - taux de M.O. du sol
 - activités biologiques
 - dégradation de la structure {
 - croûtes battance
 - macroporosité
 - infiltration
 - risques de Ruissellement + EROSION + Lessivage
 - pertes de nutriments
 - capacité de stockage (eau + nutriments) ---> fatigue du sol
 - eau utile pour la production biomasse

En savane arborée la biomasse varie entre 50 et 150 tonnes par hectare en fonction de la biomasse arborée. On constate que la litière qui peut atteindre encore 5 tonnes par hectare et par an est généralement soit consommée par le bétail, soit brûlée. Dans ces zones de savane, la surface du sol se trouve donc beaucoup moins bien protégée contre l'agressivité du climat. Les sols sont moins profonds, l'horizon de surface est moins humifère, les racines descendent moins profondément et sont généralement bloquées par un horizon d'accumulation de fer et d'argile.

Enfin, si **ces deux situations sont défrichées et mises en culture**, on constate que la biomasse est nettement moins abondante, généralement de 2 à 8 tonnes par hectare, que la litière qui elle aussi peut atteindre 5 tonnes par hectare, est très généralement consommée par le bétail, détruite par le feu ou utilisée pour des travaux artisanaux. On constate enfin que l'épaisseur de sol explorée par les racines est beaucoup moins importante

Qu'elle est l'évolution que l'on peut constater dans ces trois situations?

Au point de vue du règne végétal, on observe une simplification de l'écosystème laquelle entraîne une baisse de production de la biomasse : la protection du milieu contre l'énergie du soleil et de la pluie diminue de façon très significative.

Au point de vue du climat, on observe un réchauffement de la température et un assèchement du milieu d'autant plus que l'on constate que l'enracinement est de plus en plus réduit.

Au niveau des rivières, le ruissellement instantané étant en augmentation, le débit de pointe des rivières augmente en saison des pluies ce qui provoque la dégradation du canal et des berges des rivières. Par contre les débits d'étiage et les réserves stockées dans les nappes d'eau diminuent. Globalement l'eau disponible pour les barrages, pour les villes et pour l'irrigation va donc décroître de façon importante ; par contre l'érosion et les transports solides sur les rivières vont augmenter.

Au niveau du sol, on observe une diminution de l'épaisseur de sol exploité par les racines, une réduction des remontées biologiques, une augmentation de la vitesse de la minéralisation des matières organiques, suite au travail du sol. La diminution des apports de litière va entraîner la réduction du taux de matière organique du sol et par conséquent des activités biologiques de la faune qui se développe dans les horizons humifères. En définitive on observe une dégradation de la structure, l'apparition de croûtes de battance, une diminution de la macro-porosité et, par conséquent, une réduction de l'infiltration. Il en résulte une augmentation des risques de ruissellement, d'érosion et de lessivage des éléments nutritifs. La dégradation du sol entraîne donc une augmentation des pertes des éléments nutritifs du sol, une réduction de la capacité de stockage en eau et en nutriments, ce qu'on appelle la fatigue du sol, et enfin une réduction de l'eau utile pour la production de la biomasse.

Il existe trois causes à la dégradation des sols. D'une part un déséquilibre des matières organiques, la minéralisation étant plus rapide que les apports de litière. D'autre part une dégradation physique qui entraîne l'instabilité structurale et enfin, une dégradation chimique car les pertes ne sont plus compensées par les apports. Ceci entraîne deux effets : une perte de capacité de production, d'où une augmentation des coûts de production et une baisse de la rentabilité des opérations culturales et enfin des changements physiques, chimiques et biologiques observables dans les horizons de surface du sol.

2 Les sols dégradés sont-ils récupérables?

Là aussi deux positions peuvent se trouver parmi un public d'agronomes et de pédologues. Les uns vous diront "les sols ne sont pas une ressource renouvelable": en effet il faut cent mille ans pour altérer un mètre de granite en zone tropicale, tandis qu'il suffit de cent ans pour éroder un mètre de sol. Deuxièmement, les sols qui sont peu épais sur roche dure ou sur cuirasse ne sont évidemment plus récupérables une fois que l'horizon de surface est érodé. Enfin en zone aride, la récupération de la fertilité des sols est beaucoup plus lente. Il faut donc des milliers d'années pour reconstituer une mince couverture pédologique qui assure le stockage de l'eau et des nutriments indispensables à la bonne croissance des végétaux.

Cependant il existe à la surface de la terre de nombreux sols profonds qui ont perdu leur horizon humifère, qui sont exposés à l'ardeur du soleil et à la battante des pluies, et sur lequel rien ne pousse plus. Ces sols profonds sont-ils récupérables, en combien de temps et surtout à quel prix ? Il existe deux voies pour y arriver. La voie traditionnelle concerne l'utilisation de jachères de longue durée qui mettent dix ans à récupérer la fertilité des sols tropicaux en zone tropicale humide, cinquante ans en zone soudanienne et plus de cent ans en zone sahélienne. Il existe aussi une voie rapide qui consiste à respecter six règles pour restaurer la productivité des terres. Il faut d'abord maîtriser le ruissellement et l'érosion pour arrêter la continuité de la dégradation, deuxièmement restaurer la macro-porosité et l'enracinement profond des cultures, troisièmement stabiliser les macro-pores en enfouissant des matières organiques, de la chaux ou du gypse, quatrièmement revitaliser la couche superficielle par une addition de trois à dix tonnes par hectare de fumier fermenté, cinquièmement corriger le pH jusqu'à atteindre un pH de 5 en vue de supprimer les toxicités d'alumine, manganèse, etc. Enfin sixièmement corriger les carences du sol ou tout au moins fournir aux cultures les éléments nutritifs donc elles ont absolument besoin.

3 Comment faisaient les paysans pour restaurer les terres dégradées ?

Exemple de la méthode du zai, au Burkina Faso.

Il ne s'agit pas ici de décrire et d'admirer à la façon de Jean-Jacques Rousseau des techniques ancestrales abandonnées de nos jours. Ce qui était adapté à une société donnée il y a cinquante ans, ne l'est probablement plus aujourd'hui où la population est trois à cinq fois plus dense.

Il s'agit pour nous de comprendre le fonctionnement des méthodes traditionnelles, les facteurs de diversité, l'extension et les limites de ces méthodes sur le terrain, les raisons de leur réussite et de leur échec. Il s'agit enfin d'améliorer ces méthodes traditionnelles en y injectant des technologies modernes, telles que la fertilisation minérale d'appoint, l'usage des herbicides et pesticides, la sélection des variétés résistantes aux maladies et à la sécheresse et enfin la mécanisation des travaux durs.

Sur la figure 2, on peut voir le détail de la méthode traditionnelle du "zai" de restauration du sol telle qu'elle peut être observée en pays Mossi aux alentours de Ouahigouya au Burkina Faso, en pays Dogon au Mali, et dans la vallée de Keita au Niger. En moré, zai veut dire "se lever tôt pour préparer sa terre de façon précoce à la fraîche". Il s'agit de récupérer des terres abandonnées, dégradées par une succession de cultures et qui se trouvent être un véritable désert dénudé, décapé et encroûté où plus de 80 % des pluies ruissellent ; pourtant dans cette région, les pluies atteignent 400 à 700 millimètres par an en quatre à cinq mois. Ces zones de désert sont en croissance de 11 % en 20 ans, d'après Marchal. Face à la

Fig. 2. Le Zaï : méthode traditionnelle de restauration des sols.

Décembre à avril

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

Avril à juin

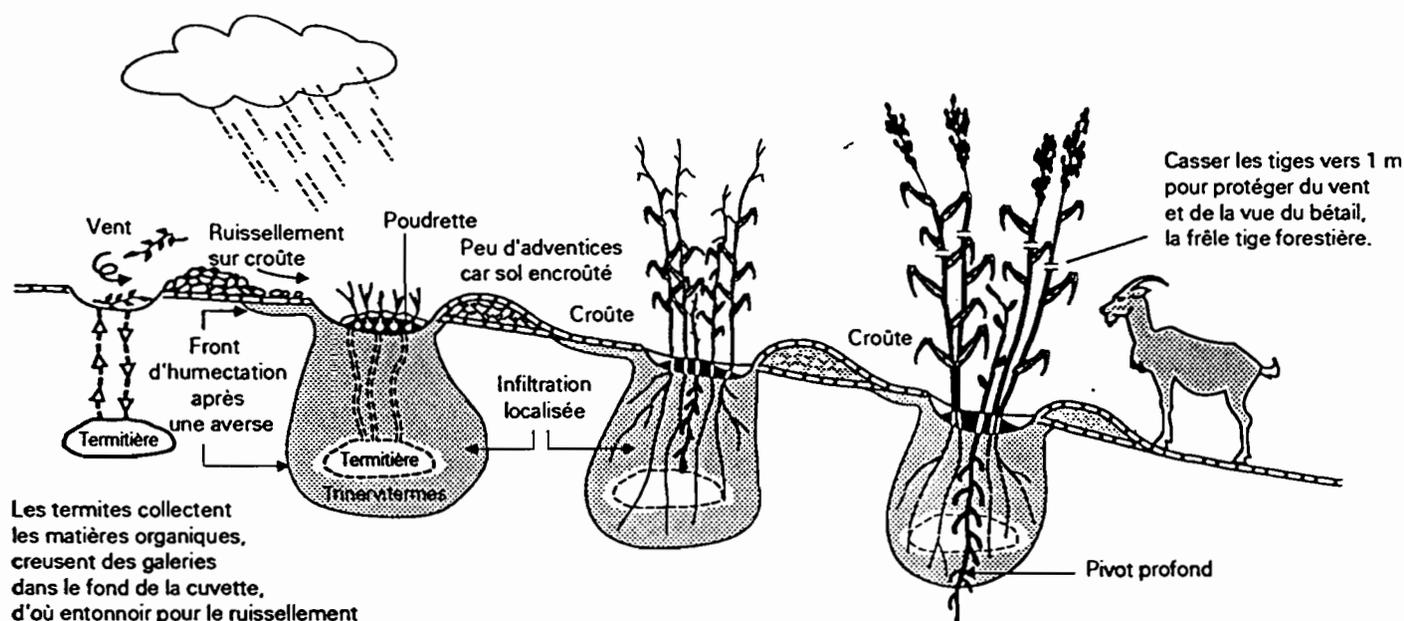
- Après la première pluie, apport de 2 poignées de poudrette (= 3 t / ha).
- Les termites y creusent des galeries enrobées d'excréments.
- Semis en poquet à la deuxième pluie.
- Eau infiltrée, stockée en profondeur à l'abri de l'évaporation directe.

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).

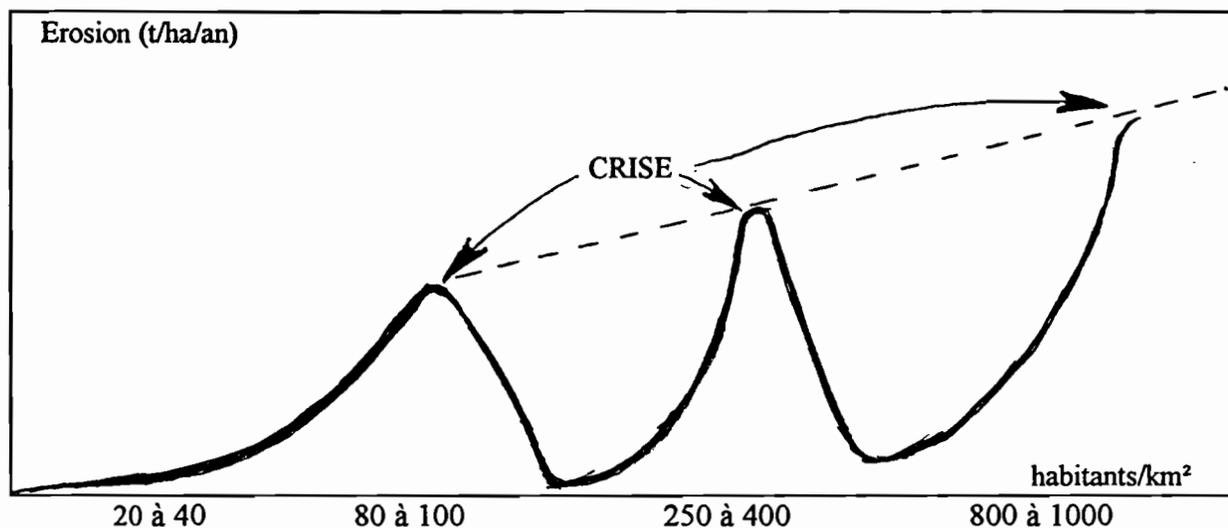
dégradation de la surface cultivable de cette région, une partie de la population masculine est obligée d'émigrer pour valoriser le travail en saison sèche dans les pays plus humides le Ghana ,la Cote d'Ivoire ou le Nigeria. Il s'en suit une diminution de la puissance du travail de la population en saison sèche.

En quoi consiste cette méthode du zai ? Elle consiste à creuser des cuvettes d'environ 40 cm de diamètre, 15 cm de profondeur en vue de capter les eaux de ruissellement. Après les premières pluies au mois d'avril, on y apporte une à deux poignées de poudrette, c'est à dire des déjections animales desséchées. Avant ou après les premières pluies on y sème une vingtaine de graines soit de sorgho dans les terrains lourds, soit de mil dans les terrains légers gravillonnaires ou sableux. Les termites attirées par les matières organiques, transforment cette cuvette en entonnoir, permettent aux eaux de ruissellement de créer des poches d'humidité en profondeur. Le Zai permet de concentrer localement la fertilité par la poudrette et en même temps l'humidité. Il s'avère que dans des terrains reconnus comme étant stériles on peut, par cette méthode, arriver à produire de l'ordre de 800 kilos de céréales par hectare et par an dès la première année. Ce système n'accélère pas la dégradation des sols ; au contraire au bout de 5 ans l'ensemble de la surface ayant été soit cultivée, soit améliorée par les termites qui viennent récupérer les résidus de culture, l'ensemble du champs peut être à son tour travaillé et entrer dans le cycle des rotations traditionnelles.

Un certain nombre de paysans astucieux ont constatés que dans les poudrettes il y avait environ une douzaine d'espèces de graines forestières et ils conservent lors du sarclage un poquet de plantules arbustives sur 5 permettant ainsi de transformer le champ en une zone agro-forestière où se développent des arbustes fourragers, généralement des légumineuses intéressantes pour l'élevage et pour la restauration de la fertilité des sols. Cette restauration de la productivité est durable puisque certains champs sont cultivés de cette façon depuis plus de 30 ans. On constate que la première année, ces graines forestières sont protégées de la vue des chèvres par les tiges de mil ou de sorgho, coupées au-delà de la hauteur du petit bétail. Ainsi protégées les jeunes tigelles forestières ne sont pas attaquées par le bétail et arrivent à recoloniser l'ensemble de cette zone.

Quelles sont les limites de cette méthode ? Tout d'abord le zai exige 300 heures de travail très dur, soit environ 3 mois pour un homme pour restaurer un hectare. Il demande aussi 3 tonnes de matières organiques et des charettes pour transporter la poudrette. Enfin pour réussir, il faut entourer le champ à restaurer d'un cordon de pierres afin de maîtriser le ruissellement et de conserver sur place les matières organiques légères que l'on y a apportées pour améliorer la productivité. Nous avons tenté 2 types d'améliorations . D'une part un sous-solage croisé à une dent jusqu'à 12 à 18 centimètres de profondeur juste après la récolte tous les 80 centimètres : ceci prend 11 heures/ha avec des boeufs bien nourris par les résidus de cultures et le creusement du zai prend moitié moins de temps. Mais surtout l'amélioration fondamentale est de constater que la poudrette apporte très peu d'azote et très peu de phosphore. Si l'on double la dose de fumier, M . Kabore a pu constater que les rendements atteignent 1 200 kilos par hectare par an et si, à la même dose de fumier, on apporte un petit complément minéral,(40 unités d'azote et de phosphore) les rendements atteignent 1 500 kilos par hectare et par an. Il faut se rappeler que la moyenne nationale de production de sorgho ou de mil est de l'ordre de 600 kilos et que la production d'un zai attend 800 kilos par hectare, dès la première année.

Figure 3 : Evolution des systèmes de production et des risques de dégradation des sols en fonction de la densité de la population rurale.



Culture itinérante	Intensification déséquilibrante	Intensification labour + fumier	Intensification labour + fumier + NPKCa
Fertilisation - cendres - longue jachère forestière	- jachère + courte - enfouissement des adventices + résidus - un peu de poudrette	- jachère très courte - légumineuses - les résidus = fourrages - mais fumier sec	- agroforesterie - compost ou mulch - vrai fumier fermenté - NPK + Ca
Elevage - presque absent - troupeau itinérant - poulets + chèvres près de l'habitation	- élevage extensif - parc de nuit - poudrette = 600 kg/vache - quelques vaches	- résidus + jachère - semi-stabulation - poudrette + compost amélioré = 1500 kg/vache - boeuf + chèvres	- résidus + fourrage + court parcours - stabulation permanente - fumier 5 à 10 t/famille - porcs + chèvres seulement
Arbre - brûlis	- brûlis + déforestation	début de l'agroforesterie	- jardins multiétagés - arboriculture fruitière
Surface d'exploitation 1 + 20 ha	1 + 5 ha	1 + 3 ha	< 1 à 0,4 ha + ressources extérieures
Agriculture - Manioc et autres racines	céréales + haricots + un peu de manioc	manioc + céréales, haricot, riz	manioc + haricots

Q - La croissance démographique conduit-elle à la dégradation complète ?

R - Quand les nuisances causées par la dégradation du milieu deviennent trop fortes, éclate une crise écologique, sociale et politique. Alors, ou les gens migrent, ou ils acceptent d'investir dans un système de production plus équilibré.

4 La dégradation des sols tropicaux est-elle inéluctable étant donnée la pression démographique ?

Localement on observe que la dégradation des sols est liée à la pression démographique sur les terres. Il s'ensuit une diminution du temps de jachère jusqu'au moment où les propriétés physiques et chimiques du sol n'arrivent plus à être restaurées : à ce moment là les terres se dégradent rapidement jusqu'à l'abandon.

La figure 3 tente de montrer qu'il existe des seuils au-delà desquels les inconvénients de la crise sont tels que la société cherche à changer son mode de vie et accepte de faire des efforts supplémentaires pour mieux gérer son environnement. Ces seuils permettent des systèmes de production de plus en plus complexes, faisant appel à plus d'intrants, plus de matière organique, d'engrais minéraux, d'herbicide, d'irrigation et agroforesterie.

Conclusion.

En guise d'introduction à cette première journée de la dixième réunion du réseau érosion consacrée aux aspects pédologiques de la dégradation et surtout de la restauration de la fertilité des sols, nous avons voulu donner quelques orientations et quelques réponses partielles aux questions qui se posent. D'autres cas de figure seront présentés par une quinzaine de collègues. Nous souhaitons que l'on ne s'arrête pas à la description des phénomènes de dégradation, ni à l'étude des processus de dégradation, mais que l'on étudie de plus près la restauration des potentialités des sols tropicaux et de pousser si possible l'analyse jusqu'aux aspects socio-économiques.

L'étude de cas que nous avons présentée montre que la restauration des sols profonds est possible, mais cela a un prix et ce prix s'évalue en heures de travail, en quantité d'intrants et en biomasse que nous devons gérer de façon à tirer le meilleur parti de la production agricole sans pour autant dégrader l'environnement.

REFERENCES :

- Kabore (M), 1993.-Etude du ZAI, méthode de restauration des sols du Pays Mossi (Burkina-Faso), sous presse.
- Marschal (J.Y.), 1983.-La dynamique d'un espace soudano-sahélien. Travaux et Documents ORSTOM. n°167.
- Roose (E.), Dugué (P.), Rodriguez (L.), 1992 - La GCES : une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso. Bois et Forêts des Tropiques, n° 233 : 49-62.

Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone Soudano-Sahélienne d'Afrique occidentale

par Eric Roose

(Dir. de Recherche Pédologie ORSTOM à Montpellier)

projet de publication dans le C.R. de l'atelier sur la jachère

Résumé

Les jachères observées en Afrique de l'ouest, leur fonctionnement et leurs objectifs sont très divers. Nous ne présentons ici que quelques résultats de mesure de ruissellement, de l'érosion, des remontées biologiques par les termites, des bilans hydriques et géochimiques en zones Soudanienne (Korhogo en Côte d'Ivoire, Mbissiri au Cameroun) et Soudano-Sahéliennes (Saria et Gonse au Burkina Faso).

Les principaux résultats sont les suivants :

- La première année, en zone Soudano-Sahélienne, les jeunes jachères sont mal couvertes par les adventices : le sol est encroûté si bien que le ruissellement ($K_r \text{ max} = 50 \text{ à } 70 \%$), l'érosion ($E = 0,5 \text{ à } 1 \text{ t/ha/an}$) et les bilans biogéochimiques sont proches de ceux des parcelles cultivées.

- Les vieilles jachères pâturées et/ou brûlées régulièrement ont un comportement à peine mieux tamponné : elles laissent circuler pas mal de ruissellement qui risque de creuser des ravines en aval dès que les pentes sont plus fortes ou que le sol travaillé est moins couvert.

- Après 2 à 3 ans de protection intégrale, par contre, le couvert végétal dépasse 85 %; le ruissellement et l'érosion deviennent négligeables (environ 1 % de ceux qu'on observe sous culture) : le bilan biogéochimique devient progressivement positif du fait de la diminution des pertes et de la capitalisation des apports par les pluies et les remontées biologiques.

- Cependant, en comparant des sols ferrugineux sableux sous vieille jachère (plus de 30 ans), sous jeune défriche (2 ans) et sous vieille défriche (plus de 30 ans de culture continue) de la région de Tcholliré au nord Cameroun, nous avons été surpris de constater que les teneurs en carbone (0,3 à 0,6), en azote (0,01 à 0,06 %) et le pH de l'eau (5,3 à 6) s'étaient peu améliorés au bout de 30 ans de jachères. Les meilleures améliorations proviennent des activités de la mésofaune (turricules de vers de terre et termitières) et des déjections animales concentrées dans un ancien parc de nuit. La capacité d'infiltration s'est nettement améliorée sur la vieille jachère grâce aux galeries des vers et des termites.

En définitive, sur ces sols ferrugineux sableux ou gravillonnaires, nous ne pouvons pas attendre une nette amélioration du potentiel de production des terres au cours des jachères de plus en plus courtes, ni même, suite à de longues périodes de jachère, si celles-ci sont soumises au pâturage et aux feux répétés.

Nous nous orientons vers la recherche de systèmes de production intensifs et durables maïs/coton en améliorant le bilan chimique (cependant, les engrais sont coûteux et acidifiants) mais surtout en couvrant toute l'année le sol d'une litière (litière d'adventices grillées aux herbicides ou de légumineuses tapissant le sol) et en augmentant la biomasse disponible pour le sol et la mésofaune (comme dans les systèmes forestiers). La réduction du travail du sol (coût : 45.000 CFA/an) dépasse largement le coût des herbicides (10.000 CFA/ha).

Les problèmes d'érosion disparaissent en même temps que le paysan y trouve son compte (moins de travail mais plus de profit) : c'est l'objectif de la G.CES (Gestion Conservatoire de l'Eau et de la Fertilité des Sols).

Mots-clés : Erosion, ruissellement, zones Soudano-Sahéliennes, restauration de la fertilité des sols, jachère, remontées biologiques par les termites

INTRODUCTION

Les jachères observées en Afrique de l'Ouest, leur fonctionnement et les leurs objectifs sont très divers. Nous n'aborderons ici que la capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols et ne présenterons que quelques résultats de mesure de l'érosion, du ruissellement des remontées biologiques par les termites et des bilans géochimiques en zone Soudanienne (Kohorgo Côte d'Ivoire et Mbissiri au Cameroun) et Soudano-Sahélienne (Saria et Gonse au Burkina Faso).

Il en ressort que l'on ne peut s'attendre sur ces sols ferrugineux sableux ou gravillonnaires très pauvres chimiquement à une nette amélioration du potentiel de production des terres au cours des jachères de plus en plus courtes, ni même suite à une longue période de jachère si celles-ci sont soumises au pâturage et aux feux répétés. Nous orientons donc la recherche de systèmes de production intensifs et durables (rotation maïs/coton) en améliorant le bilan chimique (correction des carences manifestées par les cultures) et surtout en couvrant le sol toute l'année d'une litière (adventices grillées aux herbicides ou légumineuses tapissant le sol) qui augmente la biomasse disponible pour le sol et la mésofaune (comme dans les systèmes forestiers). Les problèmes d'érosion disparaîtraient en même temps que le paysan y trouverait son compte (moins de travail du sol et plus de profit).

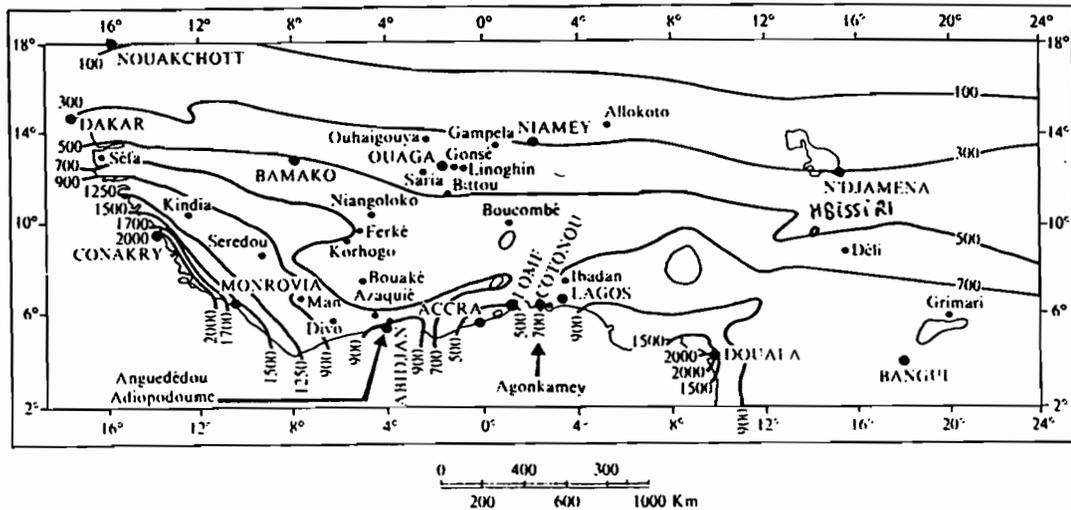
1. LE MILIEU SOUDANO-SAHELIEEN EST FRAGILE ET DIVERSIFIE

. Sous cette appellation globale, Goudet (1985) distingue trois sous régions écologiques : les régions Sahélo-Soudanienne (pluies annuelles de 300 à 600 mm), Soudano-Sahélienne (pluie de 600 à 900 mm) et Soudanienne (pluie de 900 à 1200 mm). Les exemples choisis concernent ces deux dernières régions qui ont été décrites en détail dans des travaux précédents (Roose, 1980).

. Les précipitations annuelles décroissent de 1300 mm à Korhogo (Côte d'Ivoire) à 1000 mm à Mbissiri (Cameroun) et de 800 à 600 mm à Saria et Gonse (Burkina Faso). En moyenne, elles ont perdu 30 % ces vingt dernières années.

Les pluies tombent en 5 à 6 mois avec des intensités très élevées (surtout lors des premiers orages pluie de 60 à 80 mm/heure pendant 30 minutes) en comparaison avec la faible capacité d'infiltration des sols battants (FN = 2 à 12 mm/h). Les averses journalières atteignent 65 à 75 mm tous les ans, 120 mm tous les 10 ans et 150 mm tous les 50 ans (Brunet-Moret, 1963). L'indice d'érosivité des pluies (Rusa) diminue de 500 à 300 à mesure qu'on se rapproche du Sahel (Roose, 1976 et 1980).

Figure 1 : Esquisse de répartition de l'indice d'érosivité climatique moyen en Afrique de l'Ouest et situation des parcelles.



. Les paysages les plus fréquents sur granite sont formés d'un plateau cuirassé plus ou moins vaste, d'un court éboulis de blocs de latérite ou de granite, d'un large glacis gravillonnaire recouvert d'un voile sablo-limoneux de plus en plus épais, éventuellement d'un bourrelet de berge plus argileux et d'un lit mineur encaissé ou non. La majorité des pentes sont faibles (0,5 à 3 %) mais très longues. Les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés, hydromorphes ou cuirassés en profondeur sont pauvres chimiquement (carences en azote, en Phosphore, parfois en Potassium, pH 6 à 4) et structure instable (peu de matières organiques, beaucoup de limons et sables fins dans l'horizon humifère superficiel). Dès que les sols sont dénudés, il se forme en surface une croûte de battance ou de sédimentation très peu perméable (moins de 30 mm/h en sec et moins de 10 mm/h en humide). Après quelques années de culture (coton ou arachide/niebe alternant avec des céréales comme le sorgho, le mil ou le maïs) avec labour et deux sarclages - buttages par an exécutés avec la traction animale, il se forme vers 12 - 15 cm une discontinuité peu pénétrable aux racines (lissage, compacité ou pH acide, carences ou toxicité aluminiques ?). Le pédoclimat est donc plus sec encore pour les cultures. Les jachères sont brûlées et surpâturées ou trop courtes pour régénérer la fertilité des sols : l'érosion sous jachère mal couverte entraîne encore trop de pertes.

. Les cultures laissent très peu de résidus. les tiges de cotonnier sont brûlées ; les fanes d'arachides et autres légumineuses sont utilisées comme fourrage. Les feuilles des céréales sont broutées sur place et les tiges restantes sont utilisées pour l'artisanat...ou brûlées.

. La végétation naturelle, une savane arborées assez dense à l'origine, a été sérieusement dégradées des dernières années du fait de l'extension des cultures, du ruissellement sévère et de la baisse du niveau des nappes, des énormes besoin en bois de feu et du surpâturage. Les troupeaux se sont beaucoup développés durant les années humides : aussi durant la longue période sèche qui a suivi, la biomasse produite en diminution, n'arrive plus à nourrir à la fois les troupeaux des villages et les troupeaux transhumant du Sahel vers les zones Soudaniennes (Hallam et Van Campen, 1985 ; Quilfen et Milleville, 1983).

2. LES METHODES

. Les pluies, leur hauteur, leur intensité et indice d'agressivité (Rusa de Wischmeier, 1978) ont été calculés à partir d'enregistrement de pluviographes à augets basculant tous les 0,5 mm, à rotation

journalière. L'erreur contrôlée sur des pluviomètres est très faible 1 à 2 mm et compensée d'une averse à l'autre en fonction des vents.

. Le ruissellement (exprimé en pourcentage des pluies) et l'érosion (t/ha/an) des particules fines et des sédiments grossiers ont été mesurés sur des parcelles d'érosion de 100 à 250 m² de surface, isolés de l'extérieur par des tôles de 20 cm fichées dans le sol, et par un canal en aval, une fosse de sédimentation et des cuves à partiteur. La précision maximale est de 20 %.

. Le drainage a été mesuré dans des séries de lysimètres monolithiques cylindriques (diamètre de 63 cm) de 40 - 90 - 140 et 190 cm de profondeur. Il a aussi été évalué suivant le modèle de Thortwaïthe où en saison sèche ETR = pluies - ruissellement + stock et en saison des pluies ETR = ETP et le drainage = P - ruissellement - ETR - var stock eau du sol.

. Les remontées par les termites (Trinervitermes) ont été évaluées tous les six mois pendant trois à six ans grâce au marquage à la peinture de chaque termitière et à l'évaluation du volume de chaque nouvelle logette auquel on rajoute les pertes par l'érosion pendant la même période de termitières mortes (Roose, 1976 et 1980).

. Les schémas de bilans géochimiques ont été calculés à partir des teneurs moyennes pondérées par les volumes en année moyenne sur plus de 6000 échantillons.

3. LES RESULTATS SUR LE RUISSELLEMENT, L'EROSION ET LES TERMITES

3.1. Parcelles de Saria (Roose, Arrivets et Poulain, 1979) :1971-1974

Sol ferrugineux tropical lessivé sur cuirasse à 50 cm, pente 0,7 %, surface 100 m²
Pluies de 602 à 724 mm (Md = 643), Rusa Md = 380, K = 0,06 /// 90,35 - 0,23

An	Pluies mm	Couvert végétal		KRam %			KR max %			Erosion t/ha		
		jeune jachère	vieille jachère	Sorgho	Jeune jachère	Vieille jachère	Sorgho	Jeune jachère	Vieille jachère	Sorgho	Jeune jachère	Vieille jachère
1971*	461*	<u>5 %</u>	<u>85 %</u>	26	<u>20</u>	<u>10</u>	57	<u>51</u>	<u>41</u>	5,7	0,70	0,17
1972	724	94	96	20	5	0,4	40	29	2	3,2	0,43	0,09
1973	672	96	96	29	6	0,3	64	21	1	6,2	0,19	0,10
1974	714	90	95	37	8**	3**	84	<u>30</u>	<u>8</u>	14,7	0,72**	0,34**
Moy.	643	94	96							7,3	0,51	0,17

* En 1971, les mesures n'ont débuté qu'en juillet

** En mai 1974, nous avons fauché les herbes et ramassé toutes les litières

__ : Résultat remarquable appelant un commentaire

Commentaires sur la jeune jachère protégée du bétail

. Il s'agit des repousses naturelles après une culture de mil fourrager en 1970.

. La première année le couvert végétal (CV %) est très faible (5 %) au démarrage et ne comprend que des adventices dispersées. Le sol est encroûté si bien que le ruissellement lors des premiers orages est très fort (KR max = 51 %) et l'érosion non négligeable (E = presque 1 t/ha/an).

. Dès la deuxième année, et même la quatrième, les repousses d'Andropogon couvrent bien le sol (fertilité résiduelle après cultures), le ruissellement est faible et l'érosion diminue sauf lorsqu'on a emporté la litière (**). La litière qui s'accumule sur les parcelles en défens non pâturées joue donc un rôle majeur

sur l'érosion : celle-ci reste bien plus faible que sous culture, probablement parce que le sol est encroûté et beaucoup plus vite couvert par l'andropogon que par le sorgho.

Commentaires sur la vieille jachère

. C'est une zone de sols gravillonnaires protégée des feux depuis plus de trente ans, mais parcourue par le bétail sur une pente de 2 %.

. Nous avons été surpris de constater un ruissellement non négligeable (KRam = 10 %) surtout en début de la première année (41 % de ruissellement max) où le couvert végétal n'est pas encore complet.

. Dès la seconde année, le couvert est complet (CV = 96 %), le ruissellement et l'érosion sont négligeables.

Commentaires sur les termites et l'infiltration

La protection intégrale des deux parcelles a permis d'observer une forte croissance du nombre de nids de Trinervitermes, jusqu'à 808 nids/ha représentant une remontée de terre fine en surface de l'ordre de 1200 kg/ha/an lorsque l'équilibre est atteint.

Ces termites collectrices de fourrages (graines et tiges) à la surface du sol, percent les croûtes de battance (le diamètre des trous est de 4 mm) et améliorent considérablement l'infiltration. C'est ainsi qu'en fin de saison sèche nous avons mesuré une infiltration de 10 à 12 mm/h sur sol encroûté, de 60 mm/h sur le même sol mais avec un trou de termite/100 cm², de 90 mm/h si on enlève au canif la croûte sur 5 mm, de 120 mm/h si l'on pioche le sol sur 5 cm. Ceci démontre que le profil pédologique dans son ensemble reste très perméable et que le ruissellement dépend essentiellement de l'état de la surface du sol, en particulier, des surfaces encroûtées, du couvert végétal et de l'activité de la mésofaune.

En conclusion, si l'érosion dans les jachères des pentes faibles sur glacis limono-sableux tend rapidement à s'annuler, par contre le ruissellement lors de certains événements orageux sur sols encroûtés (début de saison des pluies) ou sur sol très humides (fin août) peut dépasser 30 à 50 % et l'on observe alors des chemins d'eau qui peuvent créer des dégâts à l'aval sur les champs cultivés (donc moins cohérents) et sur les ruptures de pente.

3.2. Parcelles de Gonse (Roose, 1980) campagnes 1968-1974

Sol ferrugineux lessivé sur cuirasse vers 180 cm, pente 0,5 %, surface 250 m²

Pluies de 553 à 809 mm, Md = 691, Rusa Md = 321

Savane arborée avec touffes d'herbes : effet de la date du feu de brousse

	KRAM %	KRmax %	Erosion %	Couvert végétal %
Protection intégrale	0,3	1	0,033	85 - 95
Feux précoces	2,6	10	0,147	50 - 85
Feux tardifs	15,3	73	0,344	10 - 50

Sous une savane intégralement protégée, érosion et ruissellement sont médiocres, quelles que soient les averses : la pente est faible, le sol très couvert et les termitières Trinervitermes sont très nombreuses (1300 nids de termitières et 100 fourmilières à l'hectare) et actives (400 kg de croissance et 800 kg/ha de perte par érosion). Le nombre d'espèces végétales arbustives augmente.

Sous la même savane soumise aux feux précoces, le ruissellement ne se manifeste que lors des premiers orages, mais les jeunes semis d'arbustes disparaissent.

Lorsque ces feux sont tardifs, le couvert végétal n'arrive pas à se reconstituer, le sol s'encroûte et le ruissellement atteint des valeurs voisines des sols nus ($KR_{max} = 73\%$), l'érosion est dix fois plus forte. La litière disparaît ; les termites manquent de fourrage et attaquent les arbres déjà blessés par le feu.

Le feu a donc un impact très négatif sur la diversité des espèces végétales et animales présentes, sur la protection du sol contre l'érosion, sur l'activité des termites et de la mésofaune et sur le ruissellement. Malgré une pente de 0,5 % et un sol perméable, le ruissellement peut atteindre 75 % des averses de début de saison et retarder ainsi le démarrage de la végétation. Ces savanes peuvent donc créer des chemins d'eau dévastateurs s'ils traversent des terres cultivées.

3.3 Parcelles de Korhogo (Roose, 1980) campagnes 1967-1975

Sol ferrallitique gravillonnaire, pente de 3 %, 200 m²

Pluies de 1156 à 1723 mm (Md = 1280 mm) et Rusa Md = 658

Erodibilité du sol K diminue de 0,021 à 0,011 suite à l'apparition d'une nappe gravillonnaire

	KRAM %	KR max %	Erosion t/ha/an
Savane dégradée brûlis précoce	3,2	28	0,209
Sol nu travaillé à la houe sur 5 cm chaque mois	33	89	5,4

La savane soudanienne à *Andropogon* est très densément couverte, mais il arrive, lorsque le sol est gorgé, en pleine saison des pluies, que le ruissellement atteignent 30 % sous savane herbacée et 90 % sur sol nu.

Comme ailleurs, l'érosion est faible sous la savane mais des chemins d'eau peuvent se former qui vont créer des ravines entre les champs cultivés.

A Korhogo, les termitières sont exploitées par les Sénoufos pour nourrir les poulets : il est donc difficile d'estimer leur activité, mais la surface du sol est couverte de petites boulettes de terre fine agglomérées par la mésofaune.

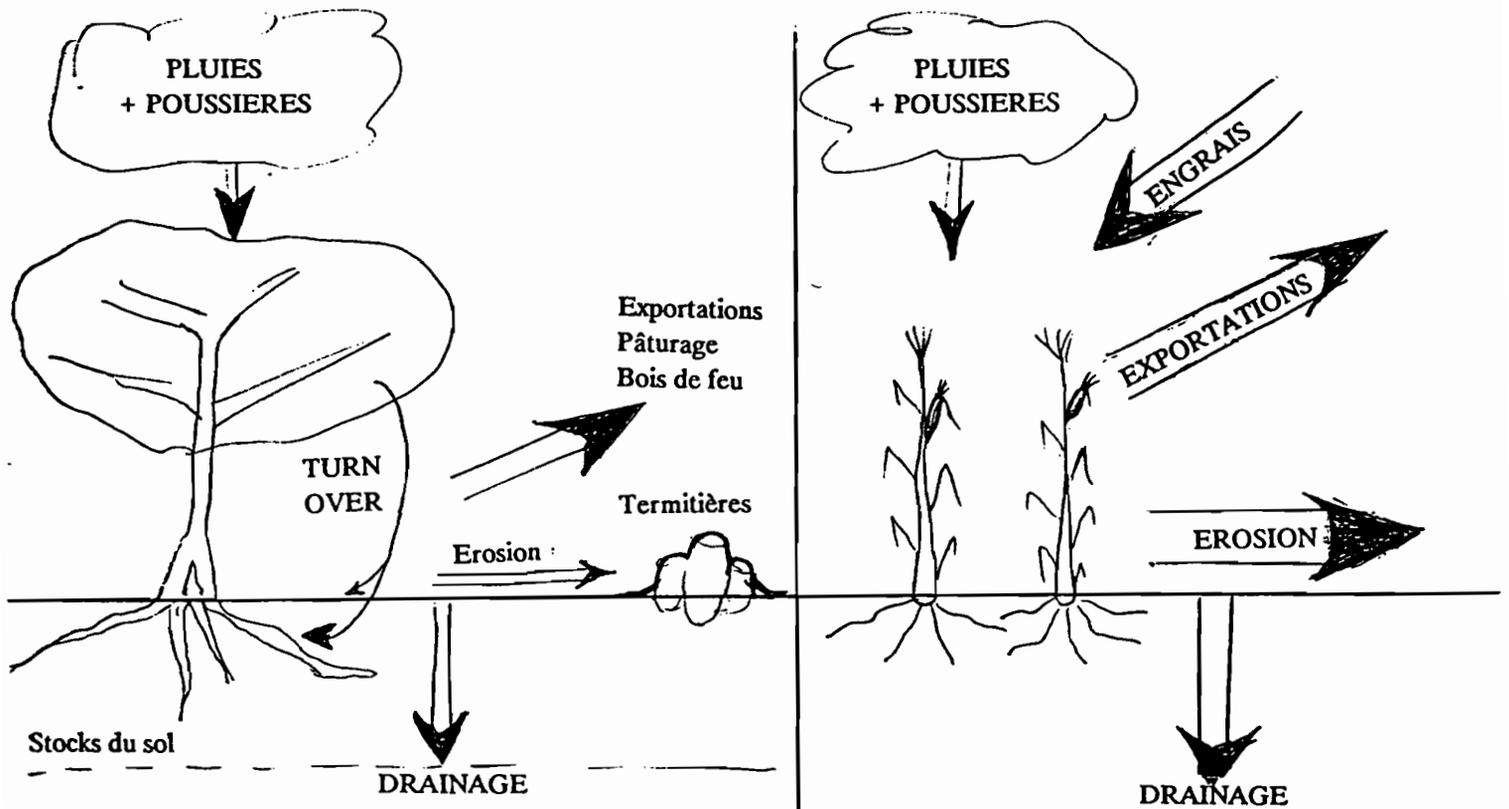
4. Un bilan biogéochimique

A la figure 2 sont rassemblées les données permettant de comparer les bilans partiels sous savane protégée et sous culture de sorgho fertilisée.

Sous la jachère savanicole de Saria, où les pertes par érosion sont réduites, le bilan entre les apports par les pluies (+ poussières) et les pertes par érosion est positif, surtout si on prend en compte les remontées biologiques profondes dont nous ignorons toujours l'ampleur. Cela se traduit sur les jachères protégées pendant plus de deux ans par une augmentation nette de la production végétale, par l'accumulation d'une litière, par l'amélioration de la capacité d'infiltration (termites) et par une lente amélioration des réserves minérales facilement assimilables. Cependant, cette amélioration n'est pas perceptible au bout de quatre ans car les flux sont faibles par rapport aux stocks du sol. L'exploitation des pailles, les feux de brousse et le surpâturage réduisent à néant les espoirs d'améliorer les faibles taux de carbone, d'azote de phosphore assimilable et bases échangeables de ces sols ferrugineux.

A Korhogo également, une enquête de la Sedes (Maynard, 1964) a montré que la durée de la jachère n'avait pas d'influence sur le rendement de la première culture.

Figure 2 : Schéma de bilan géochimique partiel sous savane et sous culture à Saria



	C	N	P	C	Mg	K	C	N	P	Ca	Mg	K
Apports												
Pluies	11,2	5,4	2,2	18,4	2,7	3,4	11,2	5,4	2,2	18,4	2,7	3,4
Engrais	-	-	-	-	-	-	-	97,0	21,9	-	-	50,0
Total	11,2	5,4	2,2	18,4	2,7	3,4	11,2	102,4	24,1	18,4	2,7	53,4
Pertes												
Erosion	9,6	1,0	0,3	1,4	0,4	1,7	155,1	16,9	3,8	14,5	9,3	46,8
Drainage	1,5	2,5	0,01	10,7	3,3	3,9	0,3	1,6	0,1	2,7	0,7	0,6
Exportations	-	-	-	-	-	-	900	40(9)	6,4(2)	0,2(9)	3,2(5)	6,8(5)
Total	11,1	3,6	0,3	12,1	3,7	5,6	1055	58,5	10,3	17,4	13,2	54,2
Stocks de sol												
sur 30 cm	18.840	1578	416 tot.	1063	294	148	18.840	1578	416 tot.	1063	294	148
			20 assim.						20 assim.			
Flux internes												
litière/résidus	1300	5,4	0,5	9,5	2,7	10,8	2,30	9,0	1,8	9	5	58,5
remontées termites	5,8	0,3	0,1	0,4	0,3	0,5	0	0	0	0	0	0

D'après Roose, 1980

Pluie = 860 mm

Erosion = 510 - 7300 kg/ha

Ruissellement = 42 mm / 208 mm

Drainage = 136 mm / 21 mm

Exportation = 2000 kg de grains et 4,5 t/ha de paille ()

Litière = 2,7 t/ha/an

Résidus = 4,5 t/ha/an

Remontées par termites = 1200 kg/ha/an

Sous sorgho moyennement fertilisé, la lixiviation par drainage est faible, mais les pertes par érosion (7,3 t de terre et 2080 m³ de ruissellement) ne sont pas négligeables en ce qui concerne le carbone (155 kg), l'azote (17 kg) et les bases (15 + 9 + 47).

Une fertilisation minérale modérée (N90 P22 K50) corrige progressivement les carences du sol et contrebalance les exportations de grains (30 à 50 kg d'azote ; 5 à 10 kg de phosphore). Mais la nutrition minérale des cultures se trouve compliquée du fait de l'exportation presque complète des pailles de sorgho où sont immobilisées pas mal de bases : 58 kg/ha de potassium, 5 kg/ha de magnésium et 9 kg/ha de chaux.

On peut observer que les stocks d'éléments échangeables sont largement supérieurs aux flux, sauf dans le cas du phosphore assimilable et du potassium, si on exporte les pailles de sorgho.

En conclusion, les bilans géochimiques sous jachère vont dépendre essentiellement des pertes par érosion et par exportation des pailles et des bois (litières).

La première année, les jachères ne protègent pas bien le sol et la règle générale en Afrique est que la jachère est pâturée par tous et qu'on peut y ramasser du bois.

De plus, les feux de brousse ne respectent ni les limites de parcelles ni les jachères. L'amélioration de la fertilité chimique de ces sol pauvres est donc très lente.

5. INFLUENCE DE LA DUREE DE LA JACHERE SUR LES INDICES DE FERTILITE DU SOL

- L'Institut de Recherche Agronomiques du Cameroun (IRA), associé au CIRAD et à l'ORSTOM, vient de lancer un programme de recherche sur l'érosion et la restauration des sols pour la mise au point des systèmes stables de production intensive de coton en rotation avec des céréales (maïs, sorgho) sur des sols ferrugineux tropicaux sableux fragiles de la zone Soudano-Sahélienne du Nord Cameroun (région de Tcholliré).

- Avant la mise en place de 57 parcelles d'érosion (100 à 1000 m²) et d'autres essais agronomiques autour du village de Mbissiri, une enquête préliminaire a été réalisée pour comparer la capacité d'infiltration des sols, les taux de matières organiques et le pH sur trois sites : la savane arborée (en jachère depuis plus de trente ans), une terre nouvellement défrichée (un an) et une terre dégradée par trente années de culture permanente.

5.1. La capacité d'infiltration

Un test d'infiltration (Pioger modifié Roose) au cylindre de 10 cm de diamètre permet d'estimer l'infiltration de 50 + 50 mm après chronométrage et correction par comparaison des taches du front d'humectation. L'infiltration finale varie de 20 à plus de 200 mm par heure après correction (par 5 à 6,5 en fonction de l'écrasement des taches), en fonction des états de surface et du traitement.

	INFILTRATION 100 mm	PROFONDEUR MOUILLEE	FORME
- Sous savane et jeune défriche	en 20 mn	20-25 cm	en obus
. sous les touffes d'Andropogon	en 1 mn		
. si jeunes turricules de vers de terre	en 2 mn		
- Sur sol dégradé par 30 ans de culture	en 45 mn	10-15 cm	champignon écrasé
. si couverture sableuse	20 mn		
. si termitière fermée	50 mn		

La longue jachère (plus de trente ans) a permis le développement d'une savane arborée avec de nombreux buissons et touffes d'Andropogon qui brûlent régulièrement. L'amélioration de l'infiltration en surface et de la répartition de l'eau en profondeur est indéniable, par rapport au sol dégradé par trente années de culture permanente : la présence d'une litière à la surface du sol, fortement transformée par les vers de terre et les termites, explique la disparition des croûtes de battance et l'amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau par la jachère.

5.2. Les matières organiques et le pH de l'horizon superficiel

On a prélevé au cylindre 48 échantillons de sol en fin de saison sèche (0-10-20-40 cm) et dosé le carbone et l'azote (au CHN) ainsi que le pH (eau 1/2,5) (et pH KCl).

	C ‰	N %	pH	
			eau	KCl
Sur termitières Trinervitermes	1,1	0,12	6,6	5,9
Sur turricule frais	1,0	0,06	7,0	6,3
Sur ancien parc de nuit	0,9	0,08	6,9	6,0
Sur vieille jachère de plus de trente ans	0,7	0,06	7 à 6	6,3 à 5,3
Sur jeune défriche de un an	0,6 à 0,5	0,05	6,9 à 5,7	5,9 à 4,7
Sur vieille défriche cultivées depuis plus de trente ans	0,3 à 0,2	0,01	6,6 à 5,3	5,7 à 4,3

Le taux de matières organiques est donc très faible sur les sols sableux cultivés ($C \times 1,78$) et l'azote est très peu abondant ($C/N = \pm 10$)

La vieille jachère de plus de trente ans, brûlée et pâturée régulièrement a peu amélioré la situation chimique : sur ces sols pauvres, on ne peut compter sur la jachère pour améliorer beaucoup la fertilité chimique des sols dégradés. Le fumier accumulé sur les lieux de pacage des animaux durant la nuit a bien amélioré la situation. Cependant, c'est la mésofaune, les vers de terre et les termites Trinervitermes (pas toutes les espèces), qui concentrent la matière organique dans les horizons humifères tandis que le feu détruit une grosse partie de la litière.

La faune et les racines ont donc un rôle important à jouer sur le bilan des matières organiques de sol puisqu'après défriche (à la main) les taux de carbone et d'azote ont déjà diminué de 10 à 20 %.

Au bout de trente ans de culture, le taux de matières organiques du sol s'est stabilisé autour de 0,5 %. Il serait intéressant de noter à partir de quel seuil de matières organiques, le sol perd sa résistance à la battance (1 % ? comme les limons en France).

Les sols pauvres en matières organiques sont aussi les plus acides et les moins saturés en bases. Le pH eau de l'eau n'atteint pourtant pas le seuil de 4,8 au delà duquel l'alumine devient toxique.

Pour évaluer l'hétérogénéité des parcelles et l'impact de trente ans de jachère sur la production de biomasse, nous avons semé du maïs en août 1991, sans engrais et sans travail du sol en dehors de sarclages complémentaires ou traitements aux herbicides. Le semis trop tardif et l'arrêt précoce des pluies n'a pas permis la récolte de graines mais seulement la pesée de la biomasse de maïs produite sur chaque parcelle (120 m²).

En poids sec à l'air, la biomasse du bloc dégradé varie de 8 à 20 kg/120 m² soit Md = 1167 kg/ha

En poids sec à l'air, la biomasse du bloc A varie de 12 à 28 kg/120 m² soit Md = 1667 kg/ha

En poids sec à l'air, la biomasse du bloc B varie de 16 à 32 kg/120 m² soit Md = 2000 kg/ha

En poids sec à l'air, la biomasse du parc varie de 20 à 36 kg/120 m² soit Md = 2333 kg/ha

Les différences physiques et chimiques observées sur les horizons supérieurs des blocs dégradés et des blocs en jachère depuis plus de trente ans, se remarquent aussi par un gain de 42 à 72 % de biomasse produite. Mais la production est très faible de toute façon

Sans apports minéraux complémentaires la productivité reste faible malgré trente années de jachère pâturée et brûlée.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

. Nos résultats ont montré que sur ces sols sableux et pauvres, la jachère courte (un an) ne peut améliorer la fertilité car le bilan n'est pas encore en équilibre : les sols étant pauvres, la végétation couvre mal le sol, si bien que l'érosion et le ruissellement sont encore importants.

. Indéniablement, la jachère longue améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, mais les gains de production sont maigres en face de l'étendue des terres immobilisées : de plus le pâturage et le feu, fréquents sur les jachères africaines, retardent encore le processus d'accumulation de la fertilité dans les horizons superficiels.

Sans apport de fumure organique ou minérale, on ne peut espérer des productions raisonnables sur ces sols sableux sur granite (2 t de coton, 2 à 3 t de maïs).

. Certes, il est toujours passionnant et utile d'améliorer nos connaissances sur le fonctionnement des jachères ... avant qu'elles ne disparaissent.

Cependant, à voir leur restriction rapide dans les pays à forte population et le temps nécessaire à la jachère naturelle pour régénérer la fertilité (bien modeste) du sol, on peut se demander s'il ne faut pas -en parallèle- étudier d'autres orientations qui répondent mieux aux besoins urgents des populations, qui doublent tous les 15 à 20 ans.

. Au lieu d'attendre que les sols soient dégradés par des cultures déséquilibrantes, n'est-il pas possible de chercher des systèmes de production à la fois intensifs (sur les meilleures terres) et protégeant le sol par une couverture permanente comme les litières des sous-bois.

. Si les sols sont déjà dégradés, ne peut-on pas développer des moyens plus rapides et plus efficaces que la jachère qui immobilise la terre pendant si longtemps ? Il existe des exemples où en une à quatre années on rétablit la productivité des terres meubles, en appliquant en même temps les quatre à six techniques nécessaires ? Ameublir le sol - le stabiliser - le revitaliser (fumier) - corriger le pH - corriger les carences et arrêter l'érosion et le ruissellement.

. Au lieu de travailler le sol et de brûler en 5 à 15 ans la majorité des matières organiques et de dégrader la stabilité de sa structure, il est probablement possible d'obtenir des rendements ou des revenus intéressants en réduisant le travail du sol au minimum, ainsi que les périodes où le sol est mal couvert, en équilibrant le bilan des nutriments et le bilan des matières organiques à l'aide de plantes de couverture (adventices ou mieux légumineuses à enracinement profond) vivant sous les cultures (cultures dérobées maîtrisées par sarclage ou par herbicide). Ces plantes de couverture associées aux cultures joueraient en quelque sorte le rôle d'une jachère permanente, limitant les fuites des systèmes de culture (érosion et lixiviation), jouissant des périodes avant et après culture pour produire de la biomasse susceptible d'équilibrer les bilans chimiques (en partie) et organiques des sols.

Liste bibliographique

- Brunet-Moret (Y.), 1963.** Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale : Haute Volta. ORSTOM-CIEM, Paris, 23 p.
- Goudet (J. P.), 1985.** Equilibre du milieu naturel en Afrique tropicale sèche. Végétation ligneuse et désertification. Bois et Forêts des Tropiques, 207 : 3-15
- Hallam (G.) et Van Campen (W), 1985.** Reacting to farmers' complaints of soil erosion on intensive farms in southern Mali. Coll. ISCO, Maracay, Venezuela, 13 p.
- Maynard (J.), 1964.** Etudes pédologiques dans la région de Korhogo (Côte d'Ivoire). Rapport ORSTOM/SEDES, Abidjan, 83 p. Cahiers ORSTOM PEDOL, 17,2 : 81-118
- Quilfen (J.P.) et Milleville (P.), 1983.** Résidus de culture et fumure animale : un aspect des relations agriculture - élevage dans le nord de la Haute-Volta. Agron. Trop., 38,3 : 206-212
- Roose (E.), 1975.** Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédologie actuelle en milieu tropical. Rapport ORSTOM Abidjan, 56 p.
- Roose (E.), Arrivets (J.) et Poulain (J.F.), 1979.** Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés issus de granite sous sorgho et savane Soudano-Sahélienne, Saria 1971-1974, Burkina Faso, ORSTOM, Paris, 123 p., multigraphié
- Roose (E.), 1980.** Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Université d'Orléans, in ORSTOM Paris, TED n°130, 587 pp.
- Roose (E.), 1980.** Dynamique actuelle d'un sol gravillonnaire issu de granite sous culture et sous savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire, Korhogo - 1967-1975. Rapport ORSTOM Paris 172 p.
- Roose (E.), 1987.** Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages Soudano-Sahéliens d'Afrique occidentale. in : Soil, crop and water management systems for rainfed agriculture in the soudano-sahelian zone. Proc. Workshop ICRISAT - INRAN : Niamey, 7-11 janvier 1987 : 55-72
- Roose (E.), Boli (Z.) et Bep (B.), 1991.** Erosion, dégradation et restauration des sols ferrugineux tropicaux sableux sous culture intensive dans la zone cotonnière du Nord Cameroun (S.E. Benacré), Comptendu 4ème mission, 15 p.

LA G. C. E. S.*

Une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive
appliquée à l'aménagement de terroirs
en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso

Eric ROOSE, Patrick DUGUÉ et Luc RODRIGUEZ



Bœufs tirant une sous-soleuse pour préparer le travail de creusement du Zaï (cf. définition p. 51) en saison sèche, fraîche (janvier) à Ségué, N.O. Burkina Faso, en 1990.

Oxen ploughing the soil to prepare the digging Zaï technique in dry and cool season (January) at Ségué, N.W. Burkina Faso in 1990.

* Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols.

Eric ROOSE
Directeur de Recherche en Pédologie
Président du réseau Foston
ORSTOM
BP 5045
34032 MONTPELLIER (France)

Patrick DUGUÉ
Ingénieur de Recherche au CIRAD SAR
Détaché auprès de l'ISRA
BP 199
KAOLACK (Sénégal)

Luc RODRIGUEZ
Chef du Service de l'Economie,
de l'Agroalimentaire
et du Développement
D.D.A.F. de l'Aude
3, rue Trivalle
11890 CARCASSONNE CEDEX 9

Depuis les années 1950 on observe, dans la frange soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale, une dégradation du couvert végétal, l'encroûtement des horizons superficiels des sols, le développement du ruissellement et des débits de pointe de crue, l'assèchement du réseau hydrographique et des nappes phréatiques en saison sèche, tout ceci dans le cadre des sociétés traditionnelles qui se désintègrent.

Nous y voyons deux causes : d'une part, le développement du bétail durant la période humide (1945-65) et la pression démographique aboutissant au surpâturage, au défrichement des terres fragiles et au déséquilibre du système traditionnel de production (culture sur brûlis suivie d'une longue jachère arbustive) ; d'autre part, la mise en place de systèmes de culture semi-intensifs « modernes » non équilibrés, comportant l'extension des cultures grâce à la mécanisation, l'introduction de cultures pures sarclées peu couvrantes, la diminution de la durée de la jachère et de la densité des arbustes (dessouchage nécessaire à l'usage de la charrue), le déséquilibre des bilans organiques et minéraux du sol, le déséquilibre entre le bétail et la disponibilité en fourrage. Dès lors, le ruissellement et l'érosion accélérés apparaissent comme des signes et des conséquences de ces déséquilibres, qu'ils vont à leur tour accélérer (ROOSE, 1980).

Face à ces problèmes généraux de dégradation des ressources naturelles, liés aux pressions démographiques et socio-économiques, se sont développées successivement deux approches.

- **La première approche**, au nom de l'intérêt public, cherche à implanter en milieu rural des équipements visant à réduire la dégradation des ressources naturelles et à protéger les ouvrages (routes, barrages, villages) des nuisances « aval » de l'érosion. De grands chantiers sont ouverts à l'échelle des bassins versants pour implanter des structures mécaniques (terrasses, gradins, fossés de drainage, exutoires, lacs collinaires) susceptibles de protéger à long terme le patrimoine foncier, mais l'entretien de ces structures pose un problème délicat ! Comment convaincre les paysans (seuls capables d'assurer l'entretien de ces aménagements) de sacrifier 5 à 15 % de la surface des terres cultivables pour assurer, à long terme, le potentiel de production et d'investir de nombreux jours de travail pour construire et entretenir ces structures antiérosives sans constater d'amélioration rapide et significative de la production des champs aménagés ?

- **La deuxième approche**, plus récente, vise plus directement le développement rural à travers la gestion des terroirs. Il s'agit de résoudre les problèmes immédiats des paysans, (à savoir la sécurité alimentaire, l'amélioration du niveau de vie, la valorisation du travail), sans pour autant dégrader le capital foncier et l'environnement rural. Cet objectif peut être atteint par une gestion performante de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

La participation paysanne, dès la phase de conception des projets, apparaît désormais, non seulement comme une condition du succès des projets de lutte antiérosive

mais comme un élément déterminant de l'orientation des actions de protection et d'amélioration foncière.

De plus, bon nombre de sols sont déjà si dégradés qu'une simple conservation de leur épaisseur ne peut améliorer la situation : il faut y associer la gestion des eaux et des nutriments (restauration de la fertilité) pour aboutir au redressement de la situation et doubler la production, tous les dix à vingt ans, pour faire face à la progression démographique.

Cette approche nouvelle, nous l'avons nommée la « Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols » (ROOSE, 1987). Nous voudrions la décrire brièvement, en prenant comme exemple l'aménagement de terroirs au Yatenga (Province du Nord-Ouest du Burkina Faso). Nous soulignerons le rôle que jouent les méthodes traditionnelles améliorées (cordons de pierres et d'herbes, boullis ou citernes, zaï forestier), la gestion de la fertilité (fosses compostières-fumières plus compléments minéraux) ainsi que les arbres dans ces paysages semi-arides, non seulement pour fournir le bois, source d'énergie indispensable à la vie courante mais aussi pour fournir des fruits et une biomasse susceptible d'améliorer la production fourragère et d'entretenir la fertilité du sol (remontées biologiques).

DÉFINITION DE QUELQUES TERMES EN LANGAGE MOORÉ

Boullis	mare creusée à l'amont de glacis limono-sableux pour collecter les eaux de ruissellement provenant des collines en vue d'abreuver le bétail et de cultiver hors-saison un petit jardin.
Zaï	signifie se lever tôt et se hâter de travailler sa terre en saison sèche fraîche. Il s'agit de piocher le sol sec pour dégager une assiette profonde de 10 cm, Ø 40 à 80 cm en quinconce tous les mètres et former un croissant avec la terre extraite. Le travail localisé + la fumure (3 t/ha de poudrette) + la concentration des eaux permettent une restauration très rapide des sols (dès la première culture).
Zipellé	veut dire terre blanchie : l'horizon sableux humifère a été décapé ; le sommet de l'horizon B encroûté par la battance des pluies est nettoyé par le ruissellement (> 80 % des pluies). Il en existe deux variétés : <ul style="list-style-type: none"> • <i>Sensu stricto</i> = glacis limono-sableux de haut de pente = couleur blanche des limons. = glacis limoneux de bas de pente, surpâturé. • <i>Sensu lato</i> = glacis gravillonnaire rouge mais stérilisé par érosion.

RESTAURATION DES SOLS SOIL RESTORATION



Amélioration paysanne : le Zaï forestier.

On peut observer dans les poudrettes une douzaine d'espèces de graines d'arbustes fourragers. Certains paysans de Gourga ont laissé ces graines pousser, un poquet sur trois. On voit que le sol a porté à la fois des céréales et des arbustes. En cinq ans, on arrive ainsi à une association céréales x arbustes (légumineuses). Cette méthode pourrait s'avérer très utile pour reforester ces sols dégradés en zone soudano-sahélienne.

Improved farming conditions : forestry Zaï.

A dozen or so species of shrub seeds used as fodder can be seen in the dried dung. Some Gourga farmers have left these seeds to grow, and the soil produced both cereals and shrubs. In five years a combination of cereals, shrubs and leguminous plants is achieved. This method could be very useful for reforesting these impoverished soils in the Sudanese-Sahelian zone.



Un réseau d'alignement de pierres et d'herbes au bas des collines permet de capter une partie des eaux de ruissellement, des matières organiques, des particules fines et des sables qu'elles transportent. En un à deux ans, les paysans arrivent ainsi à régénérer les sols dégradés. Noter aussi la protection et la plantation d'arbres utiles (fourrage - litières - fixation d'azote - remontées biologiques).

A network of rows of stone bunds and grass lines at the feet of the hills makes it possible to capture some of the runoff water and the organic matter, fine particles and sand which it contains. Within one or two years the farmers thus succeed in regenerating degraded soils. Note also the protection and the plantation of trees serving a utilitarian purpose (fodder, litter, nitrogen fixation, biological turn over).



Un « Zipellé » limoneux, en haut, a été traditionnellement restauré par la pratique du « Zaï » (en bas) qui consiste à maîtriser le ruissellement par un cordon pierreux qui entoure la zone, creuser des cuvettes et rejeter la terre vers l'aval, poser deux poignées de « poudrette » (déjections desséchées) dans la cuvette ; ces matières organiques seront exploitées par les termites (*Trinervitermes*) qui les redistribueront dans le sol troué par leurs galeries, stocker l'eau et les nutriments en profondeur dans le sol (Gourga, 1990).

*A silty Zipellé (top) has been restored in the traditional manner by the Zaï method (bottom), which consists of controlling the runoff water by a line of stones surrounding the area, pitting and displacing the earth in the downstream direction on a half-moon configuration, placing two handfuls of dried dung in each pit : this organic matter is subsequently exploited by termites (*Trinervitermes*) which redistribute it in the soil in which they build their tunnels, storing the water and nutrients deep in the soil thanks to termite tunnels (Gourga, 1990).*



Amélioration de la méthode traditionnelle du Zaï par un projet OXFAM. Noter le Zipellé dénudé à l'amont (= impluvium), les fascines qui ralentissent le ruissellement et le gaufrage du sol qui permet de concentrer les eaux là où le sorgho sera planté en poquet (Gourga, 1983).

An improvement on the traditional Zaï method made in an OXFAM project. Note the denuded Zipellé upstream (= impluvium), the faggots of brushwood which slow down the runoff, and the pitting of the soil, which enables water to be concentrated where sorghum will be planted in seed-holes (Gourga, 1983).



Variante des demi-lunes sur sols gravillonnaires stériles ayant permis la repousse de graminées annuelles (*Pennisetum*) et la croissance de variétés résistantes d'arbres (neem, acacias, eucalyptus).

*A variant of half-moons on sterile gravelly soils which has enabled annual graminaceous plants (*Pennisetum*) to grow, as well as resistant varieties of trees (neem, acacia, eucalyptus).*

RESTAURATION DES SOLS SOIL RESTORATION



Variante des cordons de pierres disposés en demi-lune sur sol gravillonnaire dégradé. Le sol est cultivé en arachide (qui assure le sarclage des arbres) et reçoit un apport complémentaire de ruissellement venant de l'impluvium. Les *Eucalyptus camaldulensis* croissent beaucoup plus vite que les essences locales testées (divers acacias).

*A variant of stone lines arranged in half-moon configuration on impoverished gravelly soil. Groundnuts are grown on the soil - which ensures that trees are cleared - and the soil receives additional runoff water from the impluvium. *Eucalyptus camaldulensis* grows much more rapidly than local species which are not so resistant to drought.*

APPROCHE PARTICIPATIVE AU DÉVELOPPEMENT RURAL

Devant les échecs répétés de la majorité des projets de développement rural comportant un volet de lutte anti-érosive, tant aux USA (LOVEJOY et NAPIER, 1986), en Afrique du Nord (HEUSCH, 1986) qu'en Afrique de l'Ouest (MARCHAL, 1979 ; ROOSE, 1987), il a bien fallu se rendre à l'évidence : l'approche technocratique ne marche pas ! D'une part, les méthodes proposées ne sont pas adaptées à la diversité des conditions écologiques et socio-économiques : il n'existe pas de référentiel démontrant la faisabilité, l'efficacité et la rentabilité des structures anti-érosives, généralement moins efficaces que les méthodes biologiques modifiant le système de production. D'autre part, pour assurer la pérennité des aménagements, il est indispensable d'obtenir la participation des gestionnaires des terres (les agriculteurs et les éleveurs) dès la définition des projets.

Prenant délibérément en charge les problèmes des paysans, la G.C.E.S. propose d'améliorer l'infiltration aux champs pour augmenter la production de biomasse (donc les rendements et les revenus nets), mieux couvrir le sol, rétablir l'équilibre du bilan des matières organiques et minérales du sol ; elle propose, par conséquent, de réduire les problèmes d'érosion et le transport solide à l'aval. Mais modifier le système de production et responsabiliser les paysans face à leur environnement sont deux actions qui prennent du temps (dix ans) car elles se déroulent en trois phases :

● **Phase de mise en confiance** et d'évaluation des risques : dialogue paysans-chercheurs-techniciens :

● Enquête sur les manifestations d'érosion : où ? (sur la toposéquence), quand ? (à quelle saison), combien ? (fréquence et importance des dégâts).

● Enquête sur les types d'érosion, les causes et les facteurs : battance en surface, ravinement, glissement de terrain. Dans quelles circonstances naissent le ruissellement et l'érosion ?

● Cartographie rapide des aptitudes et de l'occupation des terres selon une approche paysanne ou scientifique.

● Point de vue des paysans sur les risques, les causes, les inconvénients de l'érosion et les méthodes traditionnelles de gestion de l'eau, des nutriments, de la biomasse.

● Recensement des techniques traditionnelles utilisées et de la perception paysanne des techniques proposées.

● **Expérimentation quantitative** et démonstration au champ des méthodes de gestion de l'eau, de fertilisation et de lutte anti-érosive (L.A.E.) :

● Evaluer sur les champs des paysans les risques de ruissellement et d'érosion, la faisabilité (coût, travail), l'efficacité, la rentabilité des méthodes de L.A.E. proposées par les paysans et les spécialistes, en particulier le mode de travail du sol, la gestion des résidus de culture et des adventices, l'agroforesterie, la fertilisation organique et minérale, des structures perméables.

● Evaluer l'effet cumulatif en années moyennes, sèches ou humides de fréquence 1/10 ; si possible, l'agressivité des pluies des vingt dernières années observées au poste le plus voisin.

● Modéliser le bilan hydrique en s'appuyant sur les mesures de pluies journalières : évaluer les risques de lixiviation des nutriments.

● Evaluation des résultats par les paysans et les spécialistes.

● **Prévoir l'aménagement planifié** du quartier →, du versant →, du bassin élémentaire, du terroir mis en valeur par une communauté rurale, mais pas avant d'avoir convaincu une large majorité de paysans de l'efficacité et de l'intérêt des systèmes de production améliorés pour augmenter la sécurité, les rendements et valoriser le travail (ROOSE, 1987-89-90).

APPLICATION A LA GESTION DE TERROIRS AU YATENGA

Une opération de recherche-développement sur le thème de la lutte anti-érosive au sens large a été initiée par le CIRAD auprès du C.R.P.A. (Centre Régional de Promotion Agricole) de Ouahigouya. DUGUÉ (1984-89) a adapté chez les paysans le référentiel agronomique (variétés sélectionnées, fertilisation, techniques culturales, rotation) développé depuis vingt ans dans les stations de recherches du Burkina Faso. RODRIGUEZ (1986-90) a été chargé d'accompagner le développement des méthodes préconisées dans une dizaine de villages et ROOSE (1986-90) de conseiller, de suivre et d'évaluer les méthodes

d'aménagement du terroir, spécialement dans le domaine de la gestion de l'eau et de la conservation des sols. Après six années de coopération, voici, résumées, les opérations et leurs conclusions.

PHASE 1 : DIAGNOSTIC ET MISE EN CONFIANCE

Les pluies annuelles varient de 400 à 800 mm en quatre mois (plus ou moins un mois) et sont suivies d'une longue

saison sèche : l'E.T.P. atteint 2 000 mm. L'érosivité climatique est élevée (RUSA = 300 à 500) : les risques de ruissellement et d'érosion sont très élevés en début de saison humide (sol nu encroûté), le drainage potentiel est faible (100-200 mm en fin d'année humide) mais les risques de sécheresse, pendant ou à la fin du cycle cultural, sont d'autant plus élevés que le ruissellement atteint 20 à 40 % sous culture en moyenne annuelle et jusqu'à 50-80 % hors les plus fortes averses en début ou en milieu de saison des pluies (juillet-août).

Les sols ferrugineux tropicaux sont pauvres chimiquement (carence N-P et en culture intensive K + oligo-éléments) et instables de structure (faible infiltration, croûtes de battance et de sédimentation, sols durs en saison sèche et boueux après les pluies). Ils peuvent être couverts d'une nappe de sables éoliens à la limite du Sahel ou, au contraire, plus riches et plus argileux (sols bruns vertiques) sur roches basiques. Ces sols sont d'autant plus fragiles et érodibles qu'ils sont riches en limons et sables fins et pauvres en matières organiques. La population (10 habitants/km² au Nord à plus de 80 habitants/km² au Centre) se maintient suite à l'émigration généralisée des hommes adultes vers les pays plus humides où l'on valorise mieux le travail. Elle est composée de Mossi, agriculteurs possédant de petit troupeaux, et de Peuls, éleveurs nomades, plus ou moins sédentarisés, souvent ruinés par de longues sécheresses.

Sur collines et blocs de culture, le ruissellement est très élevé (20 à 40 % en moyenne annuelle, jusqu'à 80 % lors des plus fortes averses) et l'érosion est moyenne (1 à 20 t/ha/an) car la pente est faible (1-3 %) mais très sélective (matières organiques - nutriments - argile plus limon), d'où la squelettisation des horizons de surface et la dégradation rapide de la structure. Après cinq à quinze ans de culture semi-intensive, les sols sont dégradés, les matières organiques du sol ont décru de moitié, la stabilité de l'horizon sableux est très faible, il reste moins de 12 % d'argile et 1 % de matières organiques. Conclusion : il faut améliorer la gestion des eaux de surface en augmentant les apports organiques et minéraux, la couverture végétale du sol, les techniques culturales (griffage en sec, sarclottage, buttage cloisonné) et en cloisonnant le long glacis par des microbarrages perméables (cordons de pierres, bandes enherbées, lignes d'arbres et embocement).

PHASE 2 : AMÉNAGEMENT SUR LES PARCELLES PAYSANNES DES BLOCS CULTIVÉS

Les paysans Mossi regroupés par quartiers d'une trentaine d'exploitations ont choisi d'aménager d'abord leurs parcelles individuelles, puis la zone collective de parcours et le bas-fond.

● **Des structures antiérosives :** cordons pierreux perméables en courbes de niveau lissées tous les 20 à 30 mètres en fonction de la pente (1-3 %), de la profondeur du sol, des risques de ravinement et de l'acceptabilité par

les paysans. Temps de travaux : 50 hommes × jour/ha pour mettre les pierres en tas sur les collines et construire les cordons, plus un jour de camion pour le transport (coût : 18 000 FCFA/ha). Pour stabiliser les cordons, on a semé en amont une bande de 50 cm d'*Andropogon gayanus* (graines récoltées sur place en saison sèche et scarifiées dans du sable humide). Là où il n'y a pas de pierres, un simple billon (H = 20 cm) formé par deux passages opposés de charrue et une bande d'*Andropogon* remplit le même office (coût moyen de l'aménagement : 360 FF/ha).

● **Des arbres :** pour reconstituer le vieux parc de 40 arbres/ha qui réduit l'érosion éolienne et l'évaporation, il faut planter environ 120 arbres en bordure des parcelles, en aval des cordons pierreux ou sur les lignes parallèles tous les 20 mètres. Entre ces arbres, il est souhaitable d'installer une haie vive de divers épineux ou fruitiers (*Ziziphus*, par exemple) pour cloisonner les parcelles et les défendre contre la divagation du bétail.

Rôle : produire du petit bois, des perches (*Eucalyptus*), des fruits (*Sclerocarya birrea*, Néré et Karité), du fourrage (*Acacia albidu* et divers) et produire de la biomasse riche en NPK et bases (par remontée biologique) à restituer au sol.

● **Une fertilité améliorée :** gestion de la biomasse.

Traditionnellement, les résidus de culture sont pâturés et les bêtes restent sur les champs ou rentrent la nuit dans un parc (contrat de fumure entre le cultivateur et l'éleveur). La poudrette (déjections séchées et réduites en poudre par le piétinement des animaux) malheureusement ne représente que 30 % de la biomasse ingérée et très peu de nutriments. En particulier, la majorité de l'azote des déjections animales est perdue au soleil. Il faudrait enrichir le parc avec de la paille pour doubler la production de fumier (600 à 1 000 kg/an par bovin) ou maintenir les bêtes sur une fosse compostière-fumière, qui valoriserait au mieux toutes les déjections et tous les résidus organiques disponibles dans le ménage.

Mais, pour cela, il faut disposer d'une charrette (120 000 FCFA : 2 400 FF). On a donc diffusé des fosses compostières (8 à 16 m³) au coin des champs de brousse. Les résidus de culture sont collectés dans ces fosses et échappent aux feux et partiellement au bétail : ils pourrissent pendant la saison des pluies suivante et, après hâchage et retournement, sont prêts après seize mois à être enfouis aux champs. Malheureusement, ici aussi, on a perdu 60-70 % de la biomasse et des nutriments (par drainage ou par gazéification sous le soleil) : l'ombrage des arbres plantés aux quatre coins et leurs racines profondes peuvent améliorer le rendement du compostage. L'expérience a montré que les compostières de brousse sont peu efficaces car elles sont rarement pleines ; le compost est de mauvaise qualité et le *turn over* des résidus organiques est lent (18 mois). On préconise actuellement une « double fosse compostière-fumière-poubelle » à proximité de l'habitat, dans laquelle on empile tous les résidus du ménage et de l'étable pour arriver à recycler plus vite (de trois à six mois) les éléments nutritifs organiques disponibles. Enfin, traditionnellement, les paysans les plus pauvres qui ne possèdent

dent pas de bétail, et donc pas de fumier, fument leurs petits champs en les couvrant de résidus de culture et de branchages de légumineuses sauvages peu appréciées par le bétail. Il faut 4 à 6 t/ha de litière diverse pour assurer une mince couverture du sol qui va à la fois améliorer les restitutions chimiques, protéger la surface du sol contre la battance des pluies et l'énergie du ruissellement. Le paillage améliore grandement l'infiltration en favorisant l'activité perforatrice des termites et des vers de terre : ceux-ci vont devoir sortir, donc casser la croûte de battance du sol, pour récupérer les matières organiques dont ils ont besoin pour vivre. Ce dernier mode de gestion de la biomasse nous semble particulièrement efficace. car il peut réduire l'érosion de plus de 95 % si le sol est couvert, alors que la même biomasse enfouie n'améliorerait la résistance du sol à l'érosion que de 5 % (d'après le nomographe de WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971).

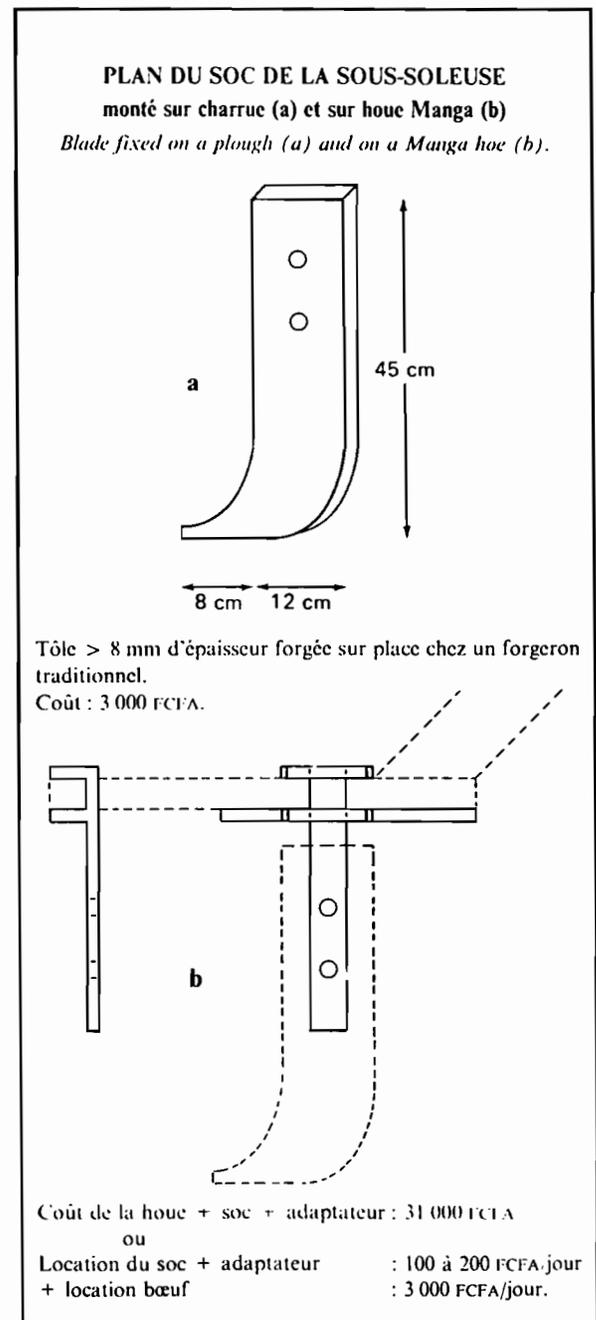
Toutefois, le peu de matière organique disponible (souvent moins de 2 t/ha/an) et les carences minérales du sol exigent des apports complémentaires d'éléments minéraux pour valoriser au mieux l'eau disponible et les potentialités du sol : 50 unités d'azote en 2 doses, 50 unités de phosphore et un peu de K-Ca-Mg et oligo-éléments si les sols sont exploités depuis longtemps. L'adjonction de phosphates calciques naturels pulvérisés (400 kg/ha tous les 2 ans) disponibles localement, mélangés dans le compost/fumier, permet une bonne valorisation des investissements sur plusieurs années.

- **Le travail du sol** : traditionnellement, le sorgho et le mil sont semés en poquet, sans labour, dès qu'une bonne averse a mouillé le sol. S'il advient deux ou trois semaines sans pluie, il faut recommencer le semis jusqu'à l'obtention d'une bonne densité : mais cette tradition est valable car les pertes de graines sont faibles (10 kg/ha) en comparaison des gains de rendement possibles (± 200 kg/ha). En station, le labour suivi de deux sarclage-buttages entraîne un gain de 50 % du rendement et encore 30 % de plus si on cloisonne le buttage (sur sol assez profond pour stocker le complément d'eau infiltrée). Sur ces sols ferrugineux, s'il y a tant de ruissellement, c'est rarement dû à l'imperméabilité des horizons profonds (sauf sur certaines cuirasses) mais bien aux croûtes de battance (infiltration finale : 1 à 10 mm/heure). Il suffit donc d'un grattage répété de la surface du sol toutes les trois semaines (environ 40-80 mm de pluie) pour maintenir la porosité ouverte et améliorer l'infiltration ; mais le labour, en plus, améliore la pénétration des racines (NICOU *et al.*, 1987).

Plus on va vers le sud et les régions soudanaises, plus le sol est travaillé (butte Sénoufo $H > 80$ cm) ; plus on va vers le nord et les régions sèches, moins on a le temps de travailler car la durée de la saison des pluies est à peine suffisante pour assurer le cycle complet des céréales. Des grattages croisés à la sous-soleuse (une tôle de 10 mm profilée et fixée sur le châssis de la houe Manga) en sec permettent de tracer un quadrillage (profondeur 10-15 mm, temps de travail = 11 heures/ha) où les premières pluies vont s'infiltrer préférentiellement et aider au

démarrage précoce des cultures. Le gaufrage du sol, lors des sarclages, aide ensuite à stocker le maximum d'eau de pluie permettant d'améliorer le remplissage des graines en fin de cycle.

Plusieurs études ont montré que l'interaction entre les structures perméables (cordons de pierres ou d'herbes) et le travail du sol en courbe de niveau, maintenant la rugosité de la surface du terrain, étaient très positives sur les rendements de la biomasse et des graines lorsque la pluie ne s'arrête pas trop tôt (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1990).



**PHASE 3 : PLANIFICATION
DE L'AMÉNAGEMENT A L'ÉCHELLE
DU VERSANT GÉRÉ PAR
UNE COMMUNAUTÉ RURALE**

Pour optimiser les aménagements, il convient de les regrouper et de les répartir sur l'ensemble du versant en jouant sur le rôle de chaque segment fonctionnel de la toposéquence : d'où la nécessité d'un plan d'aménagement global du versant ou du bassin versant, quitte à le réaliser progressivement, à mesure que la communauté rurale prend conscience de son intérêt (cf. figure 1, p. 58).

□ **Les collines caillouteuses, cuirasses et glacis gravillonnaires** : 20 à 60 % de la surface du terroir

Traditionnellement, ces zones communautaires servent de parcours extensif et de réserve de bois. Mais durant la longue période de sécheresse, ces zones furent surpâturées, les bois surexploités, si bien que les sols nus, tassés et encroûtés sont une source majeure de ruissellement qui peut dégrader le bloc de culture en aval.

Deux aménagements ont été tentés. La mise en défens localisée (1/3 de la surface pendant trois à dix ans) pour favoriser la reconstitution du couvert herbacé et arbustif (taillis) et l'enrichissement des zones dénudées (zipellé) par le travail du sol, semis d'herbes et/ou plantations d'arbustes (*Acacia*, *Balanites*). Il faut à la fois une grande patience, une bonne information et un solide gardien de fourrière (où l'on gare les animaux divagants = 100 à 200 FCFA d'amende par bête) pour limiter les tensions avec les villageois les moins soigneux et avec les éleveurs des villages voisins. De plus, s'il y a des troupeaux en transhumance, il faut entretenir des couloirs de circulation le long des axes routiers et près des points d'eau. Cette méthode, peu coûteuse et très efficace pour restaurer le capital fourrager et forestier d'un parcours, est cependant délicate à faire respecter, en particulier en mai-juin lorsqu'il manque de fourrage et que toutes les bêtes du voisinage sont attirées par cette réserve de verdure. L'opération doit être bien comprise par tous et s'étendre sur le territoire de plusieurs villages pour avoir des chances de se dérouler dans de bonnes conditions jusqu'à son terme (mise en défens d'un autre tiers). Menée avec une certaine tolérance, la mise en défens est appréciée des villageois qui espèrent protéger leurs pâturages contre les bêtes divagantes des villages voisins. La mise en défens est aussi une technique de conservation de l'eau et de lutte antiérosive très efficace (cf. tableau ci-contre).

**EFFET DE LA MISE EN DEFENS
D'UNE SAVANE ARBORÉE SOUDANO-
SAHÉLIENNE**
Gonse : 1968-1974

**EFFECT OF THE PROTECTION AGAINST FIRE
AND GRAZING OF A SUDANESE-SAHELIAN
BUSH SAVANNAH**

- Localisation : 12°22'N, 1°19'W, altitude 300 mètres.
- Dispositif : 1 parcelle de 250 m² isolée par des tôles fichées dans le sol, pente 0,5 %, longueur 46 m, sous savane arborée non pâturée, soumise à des feux précoces ou tardifs. Valeur moyenne sur 2 à 3 années déficitaires.

D'après ROOSE et PIOT, 1984.

	Protection intégrale ni feux, ni pâturage	Feux précoces en novembre	Feux tardifs en mai
Pluie			
Hauteur moyenne	736	784	613
R _{USA} * moyen	364	381	267
* Indice d'érosivité des pluies en unité américaine.			
Ruissellement			
Coefficient de ruissellement moyen annuel en %	0,2	2,6	15,3
Coefficient de ruissellement maximal journalier en %	1	10	73
Erosion kg/ha/an	32	98	344
Couvert végétal	> 85 %	50 / 80 %	10 / 50 %

Commentaires

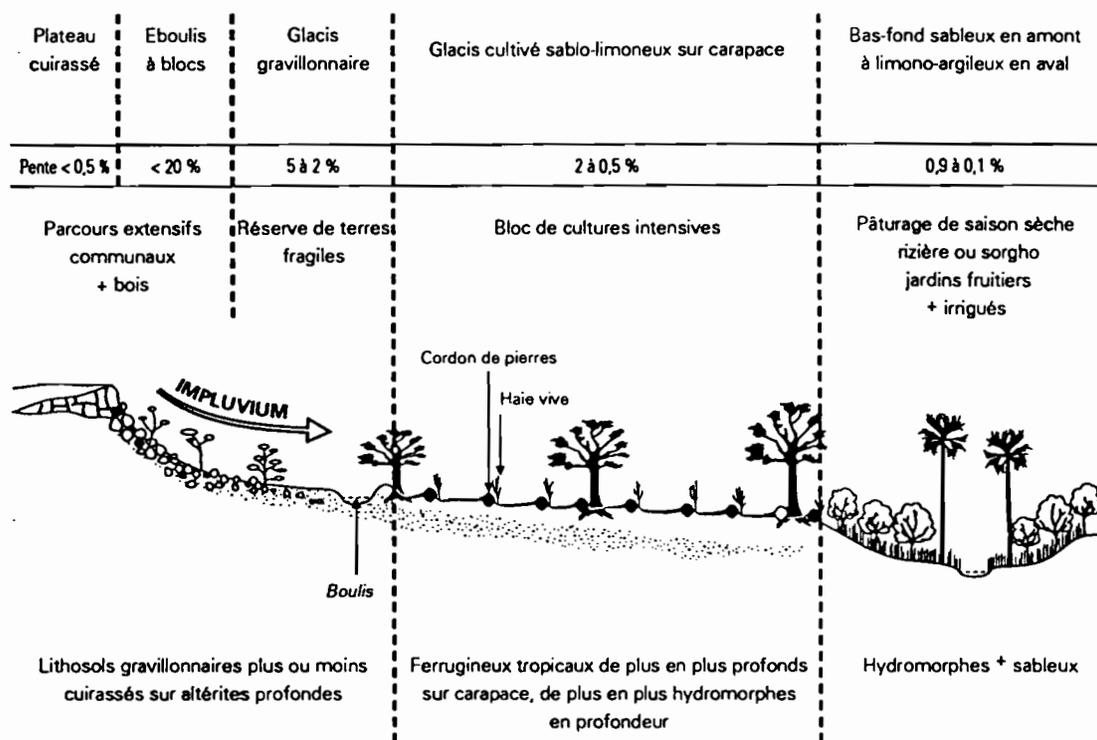
Le feu, surtout tardif, change profondément la composition végétale et laisse le sol dénudé lors des premières averses, ce qui provoque alors un fort ruissellement qui peut raviner à l'aval des terres préparées pour le semis.

La mise en défens intégrale permet de remplacer rapidement les graminées par des arbustes et de supprimer, en quelques années, les risques de ruissellement. De plus, il permet de restaurer la couverture végétale, le potentiel fourrager et l'activité de la mésofaune, indispensable au maintien de l'infiltration.

□ **Le glacis limono-argileux cultivé** : 30-50 % de la surface du terroir

Voir phase 2 – Extension à toute sa surface et alignement des cordons de pierres d'une propriété à une autre. Aménagement des voies d'accès, des exutoires et des ravines. Implantation de haies vives et d'arbres autour des propriétés et le long des cordons de pierres.

Fig. 1. — Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du Plateau Mossi : agriculture sous impluvium.
 Management scheme of a granitic soil on the Mossi Plateau : crops under rainfed farming.



Sols pauvres : carences en N et P et parfois K, Ca, Mg et oligoéléments : pH 5 à 6,5.

Sols fragiles : croûte de battance, faible infiltration, semelles de labour, pauvres en matières organiques.

Restauration de la fertilité des sols (voir Zaï) : - travail du sol, + fumier localisé, + compléments N, P, K + maîtrise du ruissellement, + sorgho ou légumineuses à fort enracinement.

Aménagements

Impluvium non cultivé

- Stockage du ruissellement.
 - 1/2 lune, microcatchment.
 - *boulis* pour le bétail.
 - lac collinaire sur site favorable.
- Mise en défens (contrat de 5 ans).
 - enrichissement en arbres fourragers sur ligne de soussolage.
 - enrichissement en herbage derrière des cordons de pierres.
 - protection contre les feux.
- Pâturage organisé par le berger communal

Cultures pluviales

- Ralentir le ruissellement.
 - haies vives + arbres en bordure.
 - cordons de pierres.
 - lignes d'herbes *Andropogon* tous les 10 à 25 m.
- Former un bocage contre le vent.
- Semis précoce dense, buttage cloisonné pour augmenter le stockage d'eau.
- Jardins irrigués en aval des *boulis*.
- Organiser des couloirs pour le bétail.
- Rotation des parcs à bétail.
- Fosse fumièrre / compostière près de l'habitat.
- Fertilisation complémentaire à la demande des cultures.

Cultures irriguées + jardins fruitiers de contre-saison.

- Étaler les crues.
- Piéger les sédiments fertiles.
 - diguettes filtrantes.
 - diguettes en mottes / casier rizicole.
 - petit réservoir villageois.
- Alimenter la nappe, pour augmenter la sécurité en période sèche.
- Éviter les grands arbres qui pompent trop d'eau dans la nappe.
- Maintenir une zone fourragère filtrante.

□ **Le glacis sableux de raccordement : 10 % du terroir**

Entre les glacis gravillonnaires et le glacis limono-argileux se trouve une zone sableuse, de sol peu épais sur la nappe gravillonnaire, jadis très cultivée (sols légers bien drainés) donc souvent très dégradée, d'autant plus qu'elle encaisse le ruissellement venant des collines. Les sols sont trop peu profonds pour les céréales exigeantes en eau mais peuvent porter temporairement des plantes rustiques (arachides, niébé et même mil à faible rendement).

● **Les mares artificielles = boulis**

A la limite entre le parcours et le bloc de culture, ces zones constituent souvent la dernière réserve de terres cultivables en cas de besoin. Nous avons proposé d'y aménager des citernes (boulis) creusées sur un 1 m de profondeur, 20 à 80 m de diamètre. La terre extraite est disposée en demi-cercle en aval pour stocker quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres cubes d'eau de ruissellement. Cette eau servira à abreuver le bétail (lui éviter bien des cheminements pour joindre les points d'eau) et/ou à l'irrigation d'appoint d'un petit jardin où croissent, à l'abri d'une haie vive, deux cultures associées à des arbres fruitiers : maïs précoce, calebasses, melons tardifs, pastèques ou légumineuses à cycle court.

S'il existe des têtes de ravine à stabiliser, on peut y creuser la citerne : on sera certain de capter beaucoup d'eau de ruissellement avant que l'incision linéaire ne déplace beaucoup de terre. Cet aménagement de la tête de ravine permet ensuite de stabiliser naturellement la ravine et d'y installer des jardins irrigables à l'abri du vent.

● **Le Zaï et le Zaï forestier : méthode traditionnelle d'avenir pour restaurer les sols et développer l'agroforesterie (cf. figure 2, p. 59)**

Ces zones dégradées peuvent être facilement restaurées grâce à la méthode du Zaï et des variantes comme le **Zaï forestier**. Il s'agit de creuser une cuvette (30 à 60 cm de diamètre, 10-20 cm de profondeur) tous les 80 cm et de rejeter la terre en croissant vers l'aval. En saison sèche, les sols dégradés sont très durs et exigent environ 300 heures de travail et 30 charrettes de fumier par hectare : un homme peut récupérer de la sorte 1/2 ha par an. Durant la saison sèche, le vent dépose dans ces cuvettes du sable et des débris organiques que les termites ne tardent pas à repérer. En venant exploiter ces matières organiques, les termites sont obligées de forer la croûte de battance et transformer ainsi la cuvette en entonnoir. De plus, les *Trinervitermes* enduisent leurs galeries de sécrétions, sources de nutriments pour les racines. Deux semaines avant les premiers orages (15 avril-15 mai), le paysan y jette une ou deux poignées de poudrette (environ 1 à 3 t/ha/an) et les recouvre de terre pour qu'elle ne soit pas emportée par le ruissellement lors des premiers orages. Les eaux de ruissellement s'accumulent dans les cuvettes et s'infiltrent à l'abri de l'évaporation directe. Grâce aux galeries de termites, le semis en poquet peut se faire juste

avant ou après les premières pluies. La surface à sarcler est réduite aux cuvettes : les 2/3 de la surface du sol restent encroûtés et les adventices ne peuvent s'y développer. Les rendements peuvent dépasser 800 kg/ha dès la première année. Les années suivantes, les souches de sorgho sont déplacées ; le semis peut alors se refaire au même emplacement si on manque de temps ou dans une cuvette intercalaire nouvelle (+ fumier). Au bout de cinq ans, tout le champ est restauré et on peut à nouveau labourer l'ensemble du champ pendant deux ou trois dizaines d'années moyennant 5 t/ha/an de fumier tous les deux ans. Certains paysans astucieux ont remarqué, dans la poudrette, les graines d'une dizaine d'espèce arborées fourragères et respectent les jeunes plantules qui poussent autour du sorgho, un poquet sur trois. A la récolte, les tiges (de sorgho sur les sols argilo-limoneux, de mil sur les sols sableux ou gravillonnaires) sont cassées vers un mètre et protègent les frêles tigelles des arbres de la vue du bétail et du vent. Au bout de cinq ans, les arbustes sont taillés (première récolte de bois de feu), élagués et éclaircis pour pouvoir continuer la culture céréalière entre les perches.

Voilà une méthode de reforestation traditionnelle avec concentration des eaux et de la fertilité, culture associée aux céréales, particulièrement bien adaptée aux zones soudano-sahéliennes dégradées lors des années sèches. Pour alléger les temps de travaux, il est possible de croiser une dent de sous-solage tous les 80 cm (11 heures/ha pour 2 bœufs en janvier à la fraîche, lorsque les bœufs ont été bien nourris avec les résidus de culture) et de réduire de moitié le temps de creusement des cuvettes (soit 150 + 11 heures) (ROOSE et RODRIGUEZ, 1990).

□ **Les bas-fonds plus ou moins hydromorphes**

Lieux de concentration des eaux et de la fertilité, les bas-fonds produisaient jadis des céréales (en année sèche) et du fourrage en fin de saison sèche. Mais si les averses sont trop violentes, les inondations peuvent noyer les céréales et détruire les récoltes. Il faut donc prévoir un zonage soigné des bas-fonds en fonction des risques et de la durée d'inondation. Pour assurer la sécurité de la production, il faut prévoir pour chaque famille des parcelles sur versants qui produiront en années humides et des parcelles de bas-fond qui produiront en années sèches.

Aménagement : on a souvent concentré les efforts dans l'aménagement des bas-fonds fertiles en édifiant soit des digues filtrantes en tête de vallée pour écrêter les débits de pointe et sédimenter les terres érodées en tête de ravine, soit de petits barrages en terre pour assurer la pérennité de l'alimentation en eau, la recharge de la nappe ou l'irrigation de petits jardins potagers et fruitiers. Dans les bas-fonds, il faut éviter de reconstituer la forêt-galerie qui risque d'épuiser la nappe : seuls les arbres fruitiers sont acceptables. Les seuils en gabion étant extrêmement coûteux (500 à 1 000 FF/m³), leur usage sera limité à l'aménagement des ravines qui gênent la circulation.

CONCLUSIONS

- Partant d'un constat d'échec des projets de lutte antiérosive qui ne répondent pas au préalable aux besoins des paysans (assurer la sécurité alimentaire, améliorer la productivité et valoriser le travail), nous avons proposé une nouvelle approche, la G.C.E.S. Celle-ci allie différentes actions (les structures antiérosives et les systèmes de culture) visant à une meilleure gestion des eaux de surface ainsi que des sources organiques et minérales de nutriments, tout en réduisant les risques de dégradation des ressources naturelles. La protection des sols n'est qu'un produit indirect de cette approche qui vise le développement rural.

- Les sols étant déjà passablement dégradés physiquement et appauvris chimiquement, la « conservation des sols » n'améliore pas nettement la production des terres et décourage les paysans. Il est donc indispensable d'associer des techniques de gestion de l'eau et de la fertilité des sols pour restaurer les potentialités des terres, afin d'améliorer nettement leur productivité.

- Or, il existe au Yatenga (comme ailleurs mais généralement les experts ne la remarquent pas) toute une collection de techniques traditionnelles de gestion de l'eau (cordons de pierres ou d'herbes, boullis) et de fertilité des sols (contrat de fumure avec l'éleveur nomade, collecte de poudrette, Zaï, paillage, agroforesterie) qui peut servir au démarrage des projets et donner un éclairage intéressant sur le diagnostic des risques de dégradation. En effet, les méthodes traditionnelles sont très bien adaptées aux conditions écologiques locales (non seulement aux conditions moyennes mais aussi aux extrêmes) : si elles ont été abandonnées, c'est souvent pour des raisons de changement des conditions socio-économiques (meilleurs salaires en ville, par exemple). Elles peuvent être rénovées par l'introduction de techniques modernes complémentaires (fertilisation minérale, irrigation d'appoint, arboriculture fruitière, soins phytosanitaires, complément fourrager pour les animaux, réalisation de véritables fumiers, culture attelée, etc.) et servir de base à la gestion durable de l'espace par les paysans.

- L'échelle du grand bassin versant, la plus satisfaisante du point de vue fonctionnement des paysages, ne convient pas toujours, car elle ne coïncide pas avec l'unité foncière gérée par une communauté rurale (le versant ou

le terroir). Avec la G.C.E.S., l'aménagement décidé et réalisé sous contrat par de petites communautés rurales (une trentaine de ménages de cultivateurs-éleveurs) touche d'abord leurs meilleures parcelles (où ils concentrent la fertilité) et ensuite l'ensemble du bloc cultivé, du versant et du terroir. En procédant ainsi, les acteurs de l'aménagement touchent immédiatement le bénéfice de leurs efforts, puis étendent les surfaces traitées et entretiennent les dispositifs simples qui se sont avérés efficaces et rentables (ex. les cordons de pierres).

- Nous tenons à souligner le rôle majeur des arbres dans l'aménagement des zones semi-arides : ils ne se limitent pas à la protection des zones dégradées mais doivent être intégrés dans les blocs de culture dont ils vont diversifier la production (bois, fourrage, litière, fruits). Les arbres sont des caisses d'épargne aussi intéressantes que les animaux, mais le capital qu'ils représentent est moins vite disponible (6 mois pour les animaux, 5 ans pour les meilleures espèces d'arbres) : la commercialisation des perches et du bois de feu en années sèches permettrait d'éviter les disettes. Il reste à mettre au point des méthodes de gestion là où le bétail est libre, des méthodes d'élagage des branches et des racines pour éviter la concurrence hydrique. Les arbres ont aussi un rôle à jouer pour maintenir le stock organique et minéral du sol (remontées biologiques par les racines profondes et le dépôt de litière).

- Les structures antiérosives sont nécessaires pour structurer le paysage, intensifier sa mise en valeur et réduire la divagation du bétail (haies vives), mais elles n'interviennent que pour 10 à 20 % de la maîtrise de l'érosion. Pour profiter au mieux de leur efficacité, il faut en même temps développer des techniques culturales qui maintiennent la rugosité de la surface du sol et détruisent les pellicules de battance. Enfin, pour tirer le meilleur parti des potentialités des terres, il faut équilibrer le bilan des matières organiques et minérales du sol et s'appuyer sur les traditions paysannes. Néanmoins, comme la population s'est beaucoup accrue, il faut améliorer nettement leur efficacité. Il manque des études sérieuses sur l'efficacité et la rentabilité à court et long terme des méthodes conservatoires, qu'elles soient modernes ou traditionnelles. ■

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENNET (H. H.), 1939. — Elements of soil conservation. McGRAW-HILL, New York.
- DUGUÉ (P.), 1986. — Appropriation des techniques de lutte contre l'érosion et le ruissellement par les paysans du Yatenga. Séminaire CIRAD/D.S.A.. Montpellier (France), 12 p.
- DUGUÉ (P.), 1988. — Possibilités et limites de l'intensification de cultures vivrières en zone soudano-sahélienne: le cas du Yatenga. Thèse ENSAM, Montpellier, 252 p.
- GRECO (J.), 1978. — La défense des sols contre l'érosion. La Maison Rustique, Paris, 183 p.
- HEUSCH (B.), 1986. — Cinquante ans de banquettes de D.R.S. en Afrique du Nord: un bilan. Cah. ORSTOM. Pédologie, 22, 2, pp. 153-162.
- LAMACHERE (J.-M.), SERPANTIE (G.), 1990. — Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne (Bidi au Burkina Faso). Bulletin du Réseau Erosion n° 11, pp. 88-104.
- LILIN (C.), 1986. — Histoire de la restauration des terrains en montagne. Cah. ORSTOM, Pédologie, 22, 2, pp. 139-146.
- LOVEJOY (J. B.), NAPIER (T. L.), 1986. — Conserving soil, sociological insights. Journ. of Soil and Water Conservation, 41, 5, pp. 304-310.
- MARCHAL (J.), 1979. — L'espace des techniciens et celui des paysans. In « Maîtrise de l'espace agraire et développement », Mémoire ORSTOM, n° 89. Paris.
- MOLDENHAUER (W. C.), HUDSON (N. W.), 1987. — Conservation farming on steep lands. Soil and Water Conservation Society, Ankeny. Iowa, 296 p.
- NICOU (R.), OUATTARA (B.), SOME (L.), 1987. — Effets et techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières au Burkina Faso. INERA-CIRAD Ouagadougou, 77 p.
- RODRIGUEZ (L.), 1990. — Les aménagements intégrés de quartiers de culture du terroir de Ziga (Burkina Faso). Projet C.R.P.A.-R.D. Comm. Atelier sur techniques de collecte et gestion des eaux de ruissellement en Afrique subsaharienne, Ouagadougou, 45 p.
- ROOSE (E.), 1980. — Dynamique de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse Doc. ès Sciences, Univ. Orléans, in « Travaux et Documents », ORSTOM Paris n° 130, 569 p.
- ROOSE (E.), PIOT (J.), 1984. — Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Central Zone of Burkina Faso). Symposium Intern. « Challenge in Africa hydrology and water resources ». HARARE, July 1984. IASII Publ. n° 144 : 485-498.
- ROOSE (E.), 1986. — Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? Cah. ORSTOM Pédologie, 22, 2, pp. 197-208.
- ROOSE (E.), 1987. — Gestion Conservatoire de l'eau et de la fertilité des Sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique Occidentale. In : « Soil, crop, water management systems for rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian zone. Proceeding ICRISAT/INRAN ». Niamey, 385 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. Comm. Conf. Intern. ISCO 6, Addis Abeba, ORSTOM Montpellier, 26 p.
- ROOSE (E.), RODRIGUEZ (L.), 1990. — Aménagement de terroirs au Yatenga. Quatre années de G.C.E.S. : bilan et perspectives. ORSTOM Montpellier, 40 p.