

Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)



Organisation
des
Nations
Unies
pour
l'alimentation
et
l'agriculture



Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)

par

Eric Roose

Directeur de recherche en pédologie

Centre ORSTOM

Montpellier, France

Service des sols — ressources, aménagement et conservation
Division de la mise en valeur des terres et des eaux, FAO

BULLETIN
PÉDOLOGIQUE
DE LA FAO

70

Organisation
des
Nations
Unies
pour
l'alimentation
et
l'agriculture



Réimpression 1999

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-57
ISBN 92-5-203451-X

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, mise en mémoire dans un système de recherche documentaire ni transmise sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit: électronique, mécanique, par photocopie ou autre, sans autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur. Toute demande d'autorisation devra être adressée au Directeur de la Division de l'information, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie, et comporter des indications précises relatives à l'objet et à l'étendue de la reproduction.

© FAO 1994

Préface

Depuis BENNET (1939), le père de la Conservation des Sols, une multitude de manuels concernant la lutte antiérosive ont été publiés dans le monde. La majorité de ces ouvrages sont rédigés en langue anglaise ou espagnole et relatent l'expérience des praticiens, les principes techniques à respecter, les méthodes mécaniques (et parfois biologiques) à mettre en oeuvre et donnent une série de recettes pratiques appliquées avec plus ou moins de succès dans une région donnée. Rares sont les auteurs qui, après avoir constaté sur le terrain le peu d'efficacité des méthodes généralement proposées, acceptent de remettre en cause les principes de lutte antiérosive développés jadis par Bennet dans des conditions écologiques et socio-économiques bien précises : les grandes cultures mécanisées peu couvrantes (arachide, coton, tabac, céréales) introduites par les immigrants européens dans la grande plaine semi-aride des Etats-Unis d'Amérique, à l'époque de la crise économique de 1930. Son approche de la conservation des sols (basée sur l'évacuation hors des champs cultivés des eaux de ruissellement dans des canaux à faible pente vers des exutoires aménagés) a ensuite été appliquée sans vérification dans des circonstances très différentes (par ex. chez les petits paysans survivant sur les montagnes tropicales) ... avec le peu de succès que l'on sait.

Or, depuis Bennet, la Science a fait des progrès considérables.

D'une part, on a découvert que l'énergie cinétique des gouttes de pluie peut être à l'origine de la dégradation des sols cultivés. Par conséquent, on peut réduire les risques de ruissellement et d'érosion en introduisant des systèmes de production couvrant mieux le sol (Ellison, 1944 ; Stallings, 1953 ; Wischmeier et Smith, 1960-78 ; Hudson, 1973 ; Roose, 1977, etc...).

D'autre part, on s'est rendu compte que les processus de dégradation des sols et d'érosion sont nombreux, leurs causes variées et les facteurs modifiant leur expression sont multiples et parfois contradictoires. En soignant l'érosion en nappe, on a quelquefois augmenté les risques de glissement de terrain (cas des marnes).

Enfin, on analyse mieux la diversité des paysages physiques et les conditions socio-économiques de l'efficacité des méthodes antiérosives. On ne traite pas de la même façon les crises érosives des grands propriétaires progressifs des zones tempérées et les problèmes de survie d'une population pauvre et nombreuse accrochée sur des pentes tropicales.

On ne peut donc plus se contenter de décrire des recettes qui ont donné de bons résultats quelque part... Il faut apprendre à évaluer la diversité des situations et à jouer avec les forces de la nature plutôt que de tenter de s'y opposer : modifier progressivement l'allure d'un versant en ralentissant les nappes de ruissellement et en orientant les travaux culturaux pour aboutir à des terrasses progressives, plutôt que de saigner la montagne à l'aide de bulldozers puissants pour créer rapidement des structures, souvent instables et coûteuses à entretenir.

Dans cet ouvrage, l'auteur voudrait rappeler aux agronomes que la lutte antiérosive n'est pas seulement l'affaire de spécialistes que l'on charge de restaurer les terres déjà dégradées par une exploitation minière productiviste : il faudra désormais intégrer le point de vue de l'aménagiste, gestionnaire de l'eau et de la fertilité des sols, lors de la mise au point de

systèmes de culture à la fois rentables et durables, sans danger pour l'environnement rural et urbain.

Depuis les années 1980, de nombreuses critiques se sont élevées pour dénoncer les échecs observés dans la majorité des programmes intégrant la lutte antiérosive. On admet aujourd'hui qu'il existe deux domaines dans la lutte antiérosive.

Le domaine de l'Etat, qui réagit aux catastrophes et délègue ses ingénieurs pour maîtriser les glissements de terrain, corriger les torrents, reforester les montagnes, aménager les rivières qui menacent les ouvrages d'art, les voies de circulation, les zones habitées, les aménagements hydrauliques, l'envasement des barrages. Pour l'intérêt public, les représentants du pouvoir central imposent des équipements hydrauliques en milieu rural. C'est coûteux, cela ne plaît pas aux paysans, mais c'est indispensable pour contrôler la qualité des eaux (logique aval) et seul l'Etat est capable d'assurer ces travaux mécaniques importants.

Le domaine paysan de la protection des terres (logique amont) que seule la communauté rurale peut maîtriser à condition qu'on l'aide à poser les bons diagnostics sur l'origine de la crise érosive et les moyens les mieux adaptés afin d'améliorer à la fois la protection du milieu, la production de la biomasse, et son niveau de vie.

C'est essentiellement dans ce dernier domaine, celui de la **gestion conservatoire des eaux de surface, de la biomasse et de la fertilité du sol**, GCES ou land husbandry des anglophones (Shaxson et al., 1987 ; Hudson, 1992), que cet ouvrage voudrait faire le point des connaissances en faisant surtout appel aux travaux de recherche des pédologues, agronomes et géographes francophones, en particulier de l'ORSTOM et du CIRAD, ayant travaillé principalement en Afrique où les problèmes évoluent plus vite qu'en Europe. Les travaux des anglophones dans ce domaine sont déjà connus par ailleurs (Wischmeier et Smith, 1978 ; Hudson, 1992).

L'auteur présente un point de vue personnel et provocateur : une approche nouvelle et plus constructive des problèmes posés aux paysans dans leur lutte contre la dégradation de leurs terres. Ce n'est pas un manuel qui présente des recettes à appliquer en face de chaque problème d'érosion, mais un ouvrage permettant aux chercheurs, formateurs et agronomes de terrain, de découvrir la diversité des situations, de poser un diagnostic sur l'origine des crises et de proposer une palette de solutions techniques dans laquelle une petite communauté rurale (une famille, un quartier, un village, un versant, une colline ou un microbassin versant) pourra choisir le paquet technologique répondant le mieux à ses problèmes. On trouvera ailleurs des exposés plus pédagogiques pour former les animateurs ruraux (Dupriez et De Leener, 1990 ; Inades, 1989) et des manuels plus techniques pour la correction torrentielle et les glissements de terrain (Heusch, 1988, documentation Cemagref) ou sur la fertilisation des sols (Piéri, 1989).

Ce document a servi de base pendant 8 ans à la formation en "GCES, en tant qu'instrument de la gestion de terroir" pour 700 ingénieurs agronomes ou forestiers du CNEARC et de l'ENGREF à Montpellier (France), de l'ENDHA en Haïti, ainsi que pour 50 techniciens supérieurs en hydraulique de l'ETSHER à Ouagadougou (Burkina Faso). Nous espérons qu'il pourra s'enrichir de vos remarques et de nouvelles expériences au cours des éditions futures. Il aura atteint son objectif s'il permet à un grand nombre d'aménagistes et d'agronomes de trouver des éléments de réflexion pour développer des systèmes agraires intensifs et durables bien adaptés à la diversité des situations écologiques et socio-économiques locales.

Table des matières

	Page
Préface	iii
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : LES STRATEGIES DE LUTTE ANTIEROSIVE ET LE CONCEPT DE LA GCES	11
1. DEFINITIONS : LES MOTS CACHENT UNE PHILOSOPHIE	13
L'érosion	13
La tolérance en perte de sol	13
La discontinuité de l'érosion dans l'espace : différents acteurs, deux logiques	15
La variabilité de l'érosion dans le temps	16
La dégradation des sols	19
Les termes du bilan hydrique	21
2. EVOLUTION HISTORIQUE DES STRATEGIES DE LUTTE ANTIEROSIVE	23
L'érosion des sols et la densité de la population	25
Les stratégies traditionnelles de lutte antiérosive	26
Les stratégies modernes d'équipement hydraulique des campagnes	27
La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols	29
3. QUELQUES ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES DE L'EROSION	45
La diversité des crises érosives	45
Qui s'intéresse à la lutte antiérosive ?	48
L'importance des averses exceptionnelles	49
L'impact de l'érosion dans différentes régions	51
Les conséquences de l'érosion sur le site érodé : les pertes de productivité	53
Les conséquences de l'érosion en aval : les nuisances	67
La rationalité économique de la GCES	69
Les critères de succès des projets de conservation des sols	72
Etude de cas au Maroc : analyse socio-économique de la LAE dans le bassin du Loukkos	76

	Page
DEUXIEME PARTIE : LA LUTTE ANTIEROSIVE EN FONCTION DES DIFFERENTS PROCESSUS D'EROSION	83
4. L'EROSION MECANIQUE SECHE	85
Définition, formes, processus	85
Les facteurs	85
Méthodes de lutte antiérosive	86
5. L'EROSION EN NAPPE OU LE STADE INITIAL DE L'EROSION HYDRIQUE	89
Les formes et les symptômes de l'érosion en nappe	89
La cause et les processus d'érosion en nappe	91
Le modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (USLE)	97
L'érodibilité des sols	101
Le facteur topographique	105
Les effets du couvert végétal	117
L'influence des techniques culturales	145
Les stratégies de lutte antiérosive	164
Les pratiques antiérosives	167
Le facteur P dans l'équation de Wischmeier	177
Les structures antiérosives en relation avec les modes de gestion de l'eau	178
La variabilité des facteurs de l'érosion	212
Conclusions sur l'applicabilité du modèle USLE en Afrique	214
La pratique du modèle de prévision de l'érosion de Wischmeier	216
6. L'EROSION LINEAIRE	219
Les formes d'érosion linéaire	219
La cause et les processus de l'érosion linéaire	221
Les facteurs du ruissellement	225
La lutte contre le ruissellement et l'érosion linéaire	228
Valorisation des aménagements de ravine	233
7. L'EROSION EN MASSE	237
Les formes d'érosion en masse	237
Les causes et les processus des mouvements de masse	239
Les facteurs de risque de glissement de terrain	241
La lutte contre les mouvements de masse	241

	Page
8. L'ÉROSION ÉOLIENNE	245
Les processus	245
Les formes des édifices éoliens	247
Les effets de l'érosion éolienne	248
Les facteurs modifiant l'importance de l'érosion éolienne	248
La lutte contre l'érosion éolienne	249
TROISIÈME PARTIE : ÉTUDES DE CAS	271
9. DIVERSITÉ DES STRATÉGIES DE LUTTE ANTIEROSIVE EN AFRIQUE OCCIDENTALE ; DE LA FORÊT SUBÉQUATORIALE AUX SAVANES SOUDANO-SAHELIENNES	275
Lutte antiérosive en zone forestière subéquatoriale :	
Zone d'Abidjan en Basse Côte d'Ivoire	276
Lutte antiérosive en milieu tropical humide dans les savanes soudanaises de Korhogo (nord Côte d'Ivoire)	279
Lutte antiérosive en milieu tropical de savane dans la région de Koutiala au Mali : agriculture pluviale sensu stricto	282
Lutte antiérosive dans les savanes soudano-sahéliennes de la région de Ouahigouya (nord-ouest Burkina Faso) : agriculture sous impluvium	284
Lutte antiérosive dans la zone nord-sahélienne aux alentours de la Mare de Dori (Burkina Faso) : cultures localisées dans les bas-fonds (valley farming)	287
10. ÉVOLUTION DU BOCAGE BAMILEKE	293
Problématique	293
Diagnostic : des milieux relativement fragiles	293
Des techniques traditionnelles efficaces	297
Les risques	301
Propositions d'amélioration	303
11. L'AGROFORESTERIE, LA FERTILISATION MINÉRALE ET LA GCES AU RWANDA	309
Problématique	309
Diagnostic du milieu	311
Les méthodes traditionnelles	315
Propositions pour la gestion des eaux de surface	317
Propositions pour la gestion de la fertilité des sols	320

	Page
12. UNE NOUVELLE APPROCHE DE LUTTE ANTIEROSIVE EN HAITI	327
Problématique	327
Diagnostic du milieu	333
Les stratégies traditionnelles paysannes et leurs limites	336
Les actions d'améliorations engagées	343
13. L'EROSION AGRICOLE DANS LES ANDES DE L'EQUATEUR	353
Problématique	353
L'érosion des sols : diagnostic et origine	353
Les risques : l'impact de l'érosion en milieu agricole	355
Propositions d'améliorations	361
14. MONTAGNE MEDITERRANEENNE EN ALGERIE	363
Problématique	363
Diagnostic : les conditions expérimentales	365
Les risques	367
Propositions d'améliorations : influence du système cultural	369
15. LE PAYS DE CAUX, REGION TEMPEREE DE GRANDE CULTURE DU NORD-OUEST DE LA FRANCE	371
Problématique	371
Diagnostic du milieu	373
Les risques : processus et dégâts	373
Solutions et démarches adoptées	375
PERSPECTIVES	381
La GCES, une nouvelle philosophie	383
La GCES, une stratégie d'action	384
BIBLIOGRAPHIE	387

Liste des figures

	Page
1. Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace : diversité des logiques et des acteurs	14
2. Nature des problèmes : le déséquilibre du milieu "aménagé" entraîne la dégradation des sols, puis l'érosion l'accélère	18
3. Bilan hydrique	22
4. Relation entre la densité de la population, l'érosion, le système de culture, le système d'élevage et la gestion de la fertilité	24
5. Le Zaï : méthode traditionnelle de restauration des sols	40
6. Influence de l'érosion cumulée sur la productivité de sols de différents niveaux de fertilité	54
7. La sélectivité, danger de l'érosion en nappe	58
8. Schéma de bilan hydrique pour la région soudano-sahélienne de Ouagadougou (Burkina Faso)	60
9. Evolution du bilan hydrique sous végétation naturelle en fonction du climat	62
10. Rendement en maïs grain pour différentes épaisseurs de décapage et trois niveaux d'apport azoté (station IITA d'Ibadan)	64
11. Production de maïs grain en fonction du niveau de décapage mécanique et de la fertilisation minérale en vue de la restauration de la productivité	64
12. Effet de l'érosion cumulée ou du décapage du sol sur leur potentiel de production	70
13. Perte de production en fonction de l'érosion cumulée	78
14. Le coût aval de l'augmentation du rythme de l'envasement	80
15. Schéma des croûtes d'érosion, des croûtes sédimentaires	90
16. Energie cinétique des pluies en fonction de leur intensité et des régions d'observation	90
17. Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen en Afrique de l'Ouest et du Centre – Situation des parcelles d'érosion	94
18. Courbes intensité/durée pour des averses de fréquence connue en chaque point, en Afrique Occidentale	96
19. Diagramme de Hjulström	100
20. Erodibilité des sols tunisiens testés au simulateur de pluies	102
21. Nomographe permettant une évaluation rapide du facteur "K" d'érodibilité des sols	104
22. Facteur topographique	110
23. Effet de la longueur de pente en trois sites plus ou moins sensibles à l'érosion en rigoles	114
24. Divers formules liant l'espacement entre les structures antiérosives et l'inclinaison des pentes en fonction des pays d'application	115
25. Evolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année	120
26. L'érosion est fonction de la hauteur du couvert végétal au-dessus du sol	124
27. Effet combiné d'une litière et d'une canopée lorsque la hauteur moyenne de chute des gouttes de pluie ne dépasse pas 1 mètre	124
28. Effet de divers traitements antiérosifs de la vigne du Beaujolais (Pommier, France) sur le ruissellement, l'érosion et la qualité du vin	126
29. Evolution du ruissellement en fonction de l'état de surface du sol et des techniques culturales sous une averse simulée de 62 m/h pendant 2 heures	150
30. La lame ruisselée = une fonction du lit de semence de maïs à Beaumont/Dème	154

	Page
31. Orientation du billonnage en fonction de la pente du terrain	160
32. Orientation des billons en montagne (Pérou et Cameroun) en fonction des risques d'averses	161
33. Tabias et déversoirs	180
34. Profil d'une tabia et de son jesser	180
35. Aménagement de l'espace rural maghrébin en fonction des facteurs hydrogéologiques	181
36. Classification des systèmes hydrauliques traditionnels en fonction des climats	182
37. Collecte et stockage du ruissellement sur versant semi-aride	183
38. Citerne et parcelle servant à tester l'irrigation contre-aléatoire d'un jardin	184
39. Agriculture sous impluvium : site expérimental de Bossomboré (Ziga, près de Ouahigouya, Burkina Faso)	186
40. Plan d'un micro-bassin	187
41. Aménagement d'une parcelle en planches drainées par un sillon vers un exutoire enherbé et une citerne sur un vertisol du Centre ICRISAT de Hyderabad	188
42. Fossés aveugles avec talus amont enherbé	189
43. Gradin ou terrasse méditerranéenne ou encore terrasse radicale	190
44. (a) Microterrasses en escalier ; (b) terrasses discontinues en gradins forestiers	192
45. Diverses structures de diversion du ruissellement	194
46. La diversion des eaux de ruissellement : principes, pratique et inconvénients	195
47. Modèle évolutif de structure antiérosive perméable en vue de la dissipation de l'énergie du ruissellement	200
48. Exemples de micro-barrages perméables en milieu semi-aride	202
49. Plan d'ensemble du dispositif expérimental de Bidi (Burkina Faso)	208
50. Comparaison des ruissellements : parcelle témoin/parcelle aménagée. Pluies standards	209
51. Comparaison des ruissellements : parcelles témoin/parcelles aménagées en fonction de l'agressivité des pluies	209
52. Digue filtrante ou semi-filtrante	210
53. Les formes d'érosion linéaire	220
54. Naissance du ruissellement : trois théories	222
55. Différents types de seuils perméables peu coûteux souples, faciles à monter avec des matériaux produits localement	234
56. Différentes formes d'érosion en masse	238
57. Glissement rotationnel en coups de cuillère	240
58. Trois processus d'érosion éolienne : suspension, saltation, traction	246
59. (a) Influence d'un brise-vent sur le vent ; (b) Influence d'un brise-vent sur la production en grain d'une céréale	250
60. Lutte antiérosive en milieu guinéen forestière subéquatorial : ex. région d'Abidjan	278

	Page
61. Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du pays Sénoufo (Korhogo) : exemple d'agriculture exigeant un drainage en zone soudanienne	280
62. Schéma d'aménagement d'un versant en pays Minianka ; exemple d'agriculture pluviale au sens strict (rainfed farming)	284
63. Schéma d'aménagement d'un terroir granitique du Plateau Mossi ; agriculture sous impluvium (runoff farming)	286
64. Schéma d'aménagement d'un terroir sahélien : exemple d'un système agropastoral où l'agriculture intensive est limitée à la vallée	288
65. Relief et distribution spatiale de la pluviosité	294
66. Géologie et répartition spatiale de la population	296
67. Organisation traditionnelle de l'espace (fragment agrandi d'un quartier du plateau granitique)	298
68. Orientation et disposition des billons sur une parcelle	300
69. Quelques aménagements antiérosives à réaliser	304
70. Carte des zones agroécologiques du Rwanda en fonction de l'altitude et des populations	310
71. Six processus aboutissent à la dégradation du milieu rural	314
72. Evolution des terrasses progressives en terrasses horizontales. Proposition du projet CIGAND	318
73. Influence des trois haies vives de <i>Leucaena leucocephala</i> et <i>Calliandra calothyrsus</i> sur le ruissellement annuel moyen, l'érosion, la production de biomasse de la haie et les récoltes des deux saisons culturales à la station ISAR de Rubona (Rwanda) sur une pente de 27 % et un sol ferrallitique acide	322
74. Les risques d'érosion et les propositions d'aménagement des collines granito-gneissiques du Rwanda	326
75. Carte d'Haïti	330
76. Coupe agro-écologique schématique du transect	332
77. Types de jardin, transferts de fertilité et formes de boisement	338
78. Confection d'une butte avec concentration de la matière organique	339
79. Réalisation de billons trop longs	340
80. Système de rampes de paille	340
81. Erosion anthropique : travail du sol sur versant	342
82. Types d'aménagement et principales actions de développement réalisés dans les sous-unités agro-écologiques du transect	344
83. Erosion et conservation des sols en Equateur (Projet DNA-ORSTOM)	356
84. Schéma et processus simplifié de l'érosion en Haute-Normandie	372
85. Parcellaire et processus d'érosion du bassin versant de Bourg-Dun (France)	374
86. Aménagement hydraulique du bassin de Bourg-Dun (France)	376

Liste des tableaux

	Page
1. Recouvrement des sols dégradés à l'abri du pâturage	38
2. Ruissellement dans les bassins-versants de Manankazo (Madagascar)	50
3. Pertes sélectives par érosion en nappe sur une pente de 7 % à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal (Côte d'Ivoire)	56
4. Schéma de bilan hydrique moyen pour la région de Ouagadougou, savane soudano-sahélienne	60
5. Trois niveaux de fertilisation sur des sols dégradés	66
6. Coût de l'érosion agricole en DH/ha/an pour rotation "céréale-jachère pâturée" sur des pentes moyennes	78
7. Coût de l'envasement	81
8. Les formes de dégradation et d'érosion, leurs causes, les facteurs de résistance du milieu ainsi que leurs conséquences sont très variées	84
9. Influence de la saison, de l'intensité maximum en 30 minutes, et des pluies de la décade précédente sur l'érosion et le ruissellement provoqués par des pluies de hauteur voisine sur un sol nu et un sol couvert	92
10. Effet de la pente sur le ruissellement et l'érosion à Séfa au Sénégal	106
11. Ruissellement et érosion sur sol nu et ananas en fonction des résidus du culture	108
12. Erosion et ruissellement en fonction des pentes sous forêt, culture et sol nu au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (Basse Côte d'Ivoire)	108
13. Erosion et ruissellement à Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) en fonction du couvert végétal, des techniques culturales et de la pente	118
14. Protection antiérosive de trois plantes fourragères après la fauche	120
15. Influence du développement d'une plante de couverture sous cultures arbustives sur la protection antiérosive du sol	122
16. Influence de l'intensification de la production sur le ruissellement et l'érosion	125
17. Effet du feu de brousse sur le ruissellement d'une parcelle (Gonse : 1967-1973)	143
18. Influence de la protection intégrale sur le ruissellement mesuré sous deux jachères (Saria, Burkina Faso)	144
19. Effet d'un labour à la houe (Adiopodoumé, p = 7 %)	146
20. Influence d'un labour suivi d'un hersage sur le ruissellement, l'érosion et la turbidité sur des parcelles nues (Adiopodoumé ; campagne 1971)	146
21. Réaction à la pluie en fonction du mode de préparation d'un sol nu ferrallitique gravillonnaire : CIRAD-Bouaké	146
22. Influence du nombre et du type de préparation du lit de semence sur un sol brun, limoneux battant, lessivé à Campagne/Hesdin, France	151
23. Influence du système de culture sur la dégradation des sols et le ruissellement lors d'une averse de 33 mm en une heure durant l'hiver	152

	Page
24. Effet des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion (provoquées par des averses de 40 mm en 1 heure simulées sur des lits de semence de maïs sur terrefort d'un coteau de Lauragais	153
25. Efficacité des systèmes de culture et des pratiques antiérosives étudiées au Brésil	156
26. Erosion, ruissellement et rendements en fonction des techniques de préparation du sol	156
27. Effet d'un buttage sur un sol presque ne (pente de 7 % ; Adiopodoumé, 1956)	158
28. Effets d'un billonnage cloisonné isohypse sur un sol sableux de Basse Côte d'Ivoire sous culture d'ananas	158
29. Facteur couvert végétal et techniques culturales pour diverses cultures en Afrique occidentale	162
30. Facteur couvert végétal en Tunisie	162
31. Techniques culturales et structures antiérosives en fonction du mode de gestion des eaux de surface	166
32. Effet d'un mulch plastique sur sol nu et <i>Panicum</i> , sur l'érosion et sur le ruissellement	174
33. Le facteur "pratiques antiérosives P" dans le modèle de prévision de l'érosion en nappe de Wischmeier et Smith	176
34. Faible efficacité sur le ruissellement, l'érosion et les rendements de diverses cultures, des bourrelets de diversion et d'un système intensive motorisé de préparation d'un sol ferrugineux peu profond sur nappe gravillonnaire. Gampela à 25 km de Ouagoudougou (Burkina Faso)	196
35. Influence des bandes d'arrêts et du travail du sol suivant les courbes de niveau en zone tropicale humide et sèche (expérimentations en parcelles d'érosion)	198
36. Effet sur l'érosion des haies vives en graminées (<i>Setaria</i>) ou en arbustes (<i>Leucaena</i> ou <i>Calliandra</i>) (sur la colline de Ruhande près de Butare au Rwanda)	198
37. Expérimentation sur l'effet des cordons pierreux et du travail du sol sur le ruissellement, l'érosion et les rendements en mil à la station de Bidi (Samniweogo), nord Yatenga, Burkina Faso	206
38. Estimation des méthodes antiérosives à mettre en oeuvre pour réduire l'érosion à une valeur tolérable	216
39. Variabilité des conditions écologiques sur un transect bioclimatiques d'Afrique occidentale – diversité des propositions d'aménagement	290
40. Erosion et ruissellement sur petites parcelles au Rwanda et au Burundi	312
41. Exigence en NPK, chaux et fumier, propre à chaque culture sur les sols ferrallitiques acides du Rwanda	323

	Page
42. Choix des espèces utilisées en fonction des facteurs agro-écologiques et des types de structures	348
43. La structure agraire en Equateur de 1954 à 1985 : nombre d'exploitations et superficie occupée	354
44. Pertes en terre sur les parcelles de 50 m ² (période 1981-84 et année 1982)	358
45. Perte en terre et pluviomètre annuelles sur les parcelles de 100 m ²	358
46. Evolution de la production agricole dans la Sierra de 1970 à 1985	360
47. Méthodes de conservation testées sur les parcelles améliorées de 1000 m ²	360
48. Ruissellement, érosion, rendements pour les 15 parcelles d'érosion de la station INRF de Ouzera, Algérie	366
49. Influence du type de sol et de la pente sur le ruissellement et l'érosion sur des jachères nues	368
50. Effet de l'amélioration des pratiques culturales sur le ruissellement, l'érosion et sur les revenus nets	368

Liste des planches photographiques

	Page
1. Erosion en nappe	127
2. Erodibilité des sols	128
3. Dégradation des sols	129
4. Effets du feu	130
5. Défrichement motorisé	131
6. Reforestation en zone soudano-sahélienne	132
7. Reforestation en zone soudano-sahélienne	133
8. DRS	134
9. DRS	135
10. Structures antiérosives en zone soudano-sahélienne	136
11. Structures antiérosives en zone de montagne	137
12. Mouvements de masse	138
13. Ravinement	139
14. Traitement des ravines	140
15. Traitement des ravines	141
16. Erosion éolienne	142
17. Travail du sol	255
18. Agroforesterie	256
19. Agroforesterie	257
20. Haïti	258
21. Haïti	259
22. Equateur	260
23. Algérie	261
24. GCES	262
25. GCES	263
26. Gestion de l'eau	264
27. Gestion de l'eau	265
28. Gestion de la biomasse	266
29. Gestion de la biomasse	267
30. Elevage	268
31. Elevage	269
32. Rwanda	270

Liste des acronymes

AREAS	: Association Régionale par l'Etude et l'Amélioration des Sols
CEE	: Communauté Economique Européenne
CEMAGREF	: Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts
CES	: Conservation de l'Eau et des Sols
CIRAD	: Centre International de Recherche en Agronomie en vue du Développement
CNEARC	: Centre National d'Etudes en Agronomie des Régions Chaudes
CTFT	: Centre Technique Forestier Tropical (CIRAD)
DRS	: Défense et Restauration des Sols
DRSPR	: Division de la Recherche sur les Systèmes de Production Rurale de l'Institut d'Economie Rurale de Bamako (Mali)
ENGREF	: Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts
ESAT	: Ecole Supérieure d'Agronomie Tropicale
ETSHER	: Ecole de Techniciens Supérieurs en Hydraulique Rurale
GCES	: Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols
IITA	: International Institute of Tropical Agriculture
ICRAF	: International Center for Research in Agroforestry
ICRISAT	: International Crop Research Institute for the Semi Arid Tropics
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique (France)
INRF	: Institut National de Recherches Forestières (Algérie)
IRA	: Institut de Recherche Agronomique (Cameroun)
IRAZ	: Institut de Recherche Agronomique du Zaïre
IRFA	: Institut Français de Recherche Fruitière outre-mer (CIRAD)
IRHO	: Institut de Recherche sur les Huiles et Oléagineux (CIRAD)
ISAR	: Institut Supérieure Agronomique du Rwanda
ISCO	: International Soil Conservation Organisation
ITCF	: Institut Technique des Céréales et des Fourrages (France)
LAE	: Lutte Anti Erosive
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
ORSTOM	: Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
RTM	: Restauration des terrains en Montagne
USDA	: United States Department of Agriculture
USLE	: Universal Soil Losses Equation (= Equation Universelle de Perte en Terre)

Remerciements

Je voudrais manifester ma reconnaissance tout d'abord à l'ORSTOM qui m'a encouragé à valoriser les connaissances acquises depuis 30 ans par les chercheurs francophones dans le domaine de la conservation des sols, l'économie de l'eau et la fertilisation.

Ensuite, je voudrais remercier MM Sanders et Griesbach du groupe de Conservation des Sols de la FAO, des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de la mise au point de cet ouvrage.

Une dizaine de collègues ont accepté de relire la première version du manuscrit : je les remercie tout particulièrement d'avoir su m'encourager à remettre l'ouvrage sur le métier pour le compléter, le rectifier et le développer. Tous m'ont apporté des idées importantes :

- Jacques Arrivets, agronome du CIRAD : ses réflexions sur l'objectif de cet ouvrage et sa présentation ;
- Christophe De Jaegher, jeune agronome en coopération au Pérou : des précisions sur les techniques traditionnelles de préparation du sol au Pérou ;
- Georges De Noni et Marc Viennot, mes camarades à l'ORSTOM : tout un chapitre sur l'érosion sur les paysages andins de l'Equateur ;
- Jean-Marie Fotsing, géographe camerounais, chargé de cours à l'Université de Yaoundé : tout un chapitre sur le bocage Bamiléké ;
- Bernard Heusch, agronome : son immense expérience sur les problèmes de conservation des sols dans le monde ;
- Charles Lilin, forestier au Ministère de l'Environnement, un chapitre sur les aspects sociologiques des crises d'érosion ;
- Raymond Mura, forestier du CEMAGREF : son expérience sur la stratégie de la restauration des terrains en montagne ;
- Jean François Ouvry, agronome qui dirige une association régionale d'amélioration foncière (AREAS), qui a rédigé une synthèse des travaux de toute une équipe de l'INRA sur l'aménagement de terroirs de grande culture dans le nord de la France.
- Chris Reij, géographe du CDCS de l'Université Libre d'Amsterdam : de nombreuses idées sur les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de conservation des sols ;
- Bernard Smolikowski, agronome en coopération et Michel Brochet, directeur de l'ESAT à Montpellier : tout un chapitre sur Haïti ;
- Christian Valentin, de l'ORSTOM, des précisions sur les organisations pelliculaires ;
- François Ségala, agronome, et Jean Claude Griesbach, géographe, fonctionnaires techniques du service AGLS de la FAO : une critique constructive et un appui très apprécié pour finaliser l'ouvrage.

Je voudrais également manifester ma reconnaissance vis-à-vis des jeunes chercheurs qui mènent leurs travaux de thèse sous ma direction ou qui ont vérifié sur le terrain certaines idées de la GCES, François Ndayizigiyé, Vincent Nyamulinda, et Léonard Sekayange au

Rwanda, Vincent Ngarambé et Théodomir Rishirumuhirwa au Burundi, Mourad Arabi, Morsli Boutkhil, Mohammed Mazour, Rachid Chebbani et les autres collègues de l'équipe érosion de l'INRF en Algérie, F.X. Masson, Djamel Boudjemline, Marie Antoinette Rahelarisoa en France, Zachée Boli et Bep Aziem, agrépédologues de l'IRA au Cameroun.

Je ne voudrais pas clore ces remerciements sans rappeler tout ce que je dois aux anciens qui m'ont patiemment initié et orienté tout au long de ma carrière : en France, Bernard Heusch, Frédéric Fournier, Claude Charreau et Georges Aubert ; dans le monde anglophone, Norman Hudson, Walter Wischmeier, Donald Meyer et William Moldenhauer.

Enfin, je remercie Mme Rigollet et Mme Smith-Redfern qui ont patiemment frappé, corrigé et édité ce document, et M Mazzei qui a redessiné bien des figures.

La plupart des photographies sont tirées de la collection personnelle de l'auteur : les autres sont signalées dans le texte : qu'ils trouvent ici notre gratitude pour leur collaboration.

Les idées n'appartiennent à personne. Elles sont le fruit d'une longue gestation du monde et d'une rencontre entre des hommes et des conditions écologiques et socio-économiques. Que tous ceux qui ont participé à ce long accouchement trouvent ici leur part de reconnaissance.

INTRODUCTION

L'érosion façonne la Terre depuis qu'elle est émergée... Et depuis plus de 7 000 ans, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement (Lowdermilk, 1953). On pourrait donc se demander s'il reste encore quelque chose à découvrir pour la recherche... et quelque chose à écrire qui n'ait pas encore été dit !

Cependant, les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20^{ème} siècle ; d'abord en Allemagne (Wollny), puis 40 ans plus tard, aux Etats Unis d'Amérique, à l'époque de la grande crise économique. Le Gouvernement américain, poussé par l'opinion publique affolée par les vents de sable obscurcissant le ciel en plein jour (Dust Bowl), chargea Bennet de monter le fameux Service de Conservation des Sols et de l'Eau américain et une dizaine de stations expérimentales pour mesurer au champ, le ruissellement et les transports solides. Il fallut encore attendre les années 1940 pour qu'un chercheur, confiné dans son laboratoire alors que les bombes pleuvaient sur l'Europe, découvre que l'énergie cinétique développée par la chute des gouttes de pluie était à l'origine de la dégradation de la surface du sol, du ruissellement et d'une bonne partie de l'érosion observée sur les terres cultivées (effet splash) (Ellison, 1944).

Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, que les méthodes américaines de mesure du ruissellement et de l'érosion sur petites parcelles se sont répandues en Afrique francophone (F. Fournier) et anglophone (N.W. Hudson), puis en Amérique latine, et plus récemment, en Asie et en Europe.

L'Amérique avait donc 20 ans d'avance sur le reste du monde pour collecter des données et développer un premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978). La seule prétention de ce modèle (USLE) est d'aider à la décision les ingénieurs qui doivent définir des systèmes de conservation des sols pour des conditions particulières de sol, de climat, de topographie et de couvert végétal. Il a déçu bien des chercheurs qui l'ont utilisé à tort, hors de son domaine de validité. Bien qu'il soit apparu finalement que l'équation USLE ne soit pas universelle, mais que son application est limitée là où l'énergie érosive ne provient pas seulement des pluies (mais aussi du ruissellement comme en montagne et sur les sols riches en argiles gonflantes — ou de la gravité en cas de glissement de terrain), ce modèle un peu dépassé, est encore de nos jours — et pour longtemps — le seul suffisamment calibré pour être appliqué dans un grand nombre de pays où le ruissellement est lié à la dégradation de la surface du sol. Il faudra encore une douzaine d'années pour mettre au point les nouveaux modèles physiques et les calibrer pour chaque région. Finalement, il n'est pas sûr qu'ils soient plus performants que les dernières versions de l'USLE... à condition qu'on reste dans son domaine d'application : l'érosion en nappe.

Dans le domaine de la conservation des sols également, on s'est longtemps contenté d'appliquer partout dans le monde, les méthodes développées aux Etats Unis, sans vérifier localement leur efficacité. Cependant, ces dix dernières années, la prise en compte des

facteurs climatiques, sociaux, démographiques et économiques, ainsi que de nouveaux résultats expérimentaux, ont remis en cause les recettes décrites dans tous les manuels depuis Bennet.

Il s'agit d'abord du taux croissant d'échec des projets de lutte antiérosive dans les pays en voie de développement (Hudson, 1992) : les méthodes américaines ne s'appliquent pas avec succès dans les pays tropicaux. Les paysans, qui connaissaient des stratégies de gestion de l'eau et de la fertilité des sols dans leur agriculture traditionnelle, ont été déçus par les méthodes modernes de conservation des sols imposées par les experts internationaux et le pouvoir central : elles exigent beaucoup de travaux, beaucoup d'entretien, et n'améliorent pas la productivité des terres. Même si la couverture pédologique reste sur les parcelles, les sols tropicaux sont généralement si pauvres, qu'il faut restaurer leur fertilité en même temps qu'améliorer leur capacité d'infiltration pour arriver à produire nettement plus que les systèmes traditionnels.

Ailleurs, les paysans abandonnent les terres aménagées ou détruisent les arbres donnés gratuitement par les projets, car ils soupçonnent l'Etat de vouloir mettre la main sur leurs terres. Traditionnellement en effet, la terre appartient à celui qui l'aménage... et les arbres la délimitent ; d'où ces terribles confusions et les nombreux échecs observés dans tout le Maghreb et en Afrique occidentale.

Même aux Etats Unis, l'évaluation de 60 années de conservation des eaux et des sols (CES) qui a englouti des milliards de dollars conclut à une réussite mitigée. Il y a encore de gros problèmes de pollution (liés à l'élevage, à la fumure minérale et à l'industrie) et de transports solides dans les rivières : 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an de sédiments, limite tolérée officiellement sur les sols profonds. Certes, la situation serait pire aujourd'hui si l'on n'avait rien fait, mais il faut se demander s'il ne faut pas changer d'optique. Jusqu'ici, la protection des sols était réalisée par les paysans volontaires, avec l'aide de l'Etat, car il était évident pour tous qu'il fallait protéger l'environnement pour sauver la productivité des terres pour les générations futures.

L'enquête américaine montre que l'érosion n'entraîne pas forcément une chute de productivité des terres, en particulier sur les loess épais les plus riches. Aujourd'hui, l'Etat tend à introduire des clauses coercitives du genre "si vous ne participez pas au programme de gel des terres fragiles, des marécages et des montagnes, ou si vous ne suivez pas les instructions pour l'aménagement antiérosif des terres cultivées, vous n'aurez plus droit aux subsides que l'Etat américain distribue aux agriculteurs pour les encourager à diversifier leur production".

L'analyse des effets de l'érosion sélective sur les terres tropicales, en particulier les terres forestières où la fertilité chimique et biologique est concentrée dans les 25 premiers centimètres du sol, montre :

- qu'il ne suffit pas d'aménager les terres dégradées (défense et restauration des sols : DRS) pour répondre aux problèmes des paysans,
- que même la conservation des eaux et des sols (CES) est mal acceptée car elle demande beaucoup de travail et améliore peu la productivité des sols.

Si on veut relever le défi de ce siècle, nourrir une population qui double tous les 20 ans, il faut non seulement bloquer les processus graves (ravinelements, glissements de terrain) qui sont à l'origine des transports solides des rivières (domaine de l'Etat), mais aussi gérer l'eau et les nutriments sur les bonnes terres, avant même qu'elles ne se dégradent et restaurer les sols dégradés, mais potentiellement productifs. Seules les communautés paysannes sont capables de gérer l'environnement rural. Pour emporter l'adhésion du paysan, il faut lui démontrer, sur ses propres terres, qu'une saine gestion du terroir (comprenant un ensemble de paquets technologiques) peut améliorer rapidement sa production et ses revenus, valoriser son travail et rentabiliser ses efforts tout en protégeant efficacement son capital foncier.

A noter qu'il n'est pas toujours nécessaire de recourir à des techniques sophistiquées, des intrants coûteux, importer des machines difficiles à entretenir. Il suffit souvent de marier les connaissances scientifiques sur les processus à corriger, avec le savoir-faire traditionnel pour obtenir des résultats étonnants. C'est le cas d'une méthode traditionnelle (zaï) de restauration des sols dégradés (zipellé) des Mossi au Burkina Faso. Sans autre apport que le travail (350 heures/ha) et le fumier (3 t/ha/an), on peut obtenir de 600 à 1 000 kg de grains sur ces champs régénérés. Avec un peu d'engrais minéral complémentaire (N et P), on devrait pouvoir faire nettement mieux que la moyenne nationale (6 quintaux/ha/an). (Roose, Dugue et Rodriguez, 1992).

Des circonstances favorables ont permis un changement d'attitude des paysans vis-à-vis des projets de conservation des sols.

D'abord, la sécheresse a beaucoup fait souffrir les populations sahéliennes et a réduit le cheptel de moitié. Elle a montré aux paysans qu'il fallait changer leur mode d'exploitation extensif, équilibrer la charge en bétail avec les disponibilités fourragères, organiser l'aménagement du terroir villageois dont on a enfin découvert les limites. Cette crise a montré qu'il fallait non seulement protéger les terres contre l'érosion (exprimée en t/ha/an), mais surtout, gérer l'eau disponible (réduire le ruissellement) et les nutriments (paillage, fumier, compost et compléments minéraux), arrêter les pertes d'eau et de nutriments causées par l'érosion d'abord et par le drainage, ensuite.

Curieusement, l'**opération "vérité des prix"** des engrais minéraux exigée par la Banque Mondiale en Afrique, a révélé l'intérêt des engrais organiques et surtout, la faiblesse des stocks d'éléments nutritifs facilement utilisables par les plantes dans la majorité des sols tropicaux (à part quelques sols volcaniques, bruns vertiques ou alluviaux). Il est extrêmement dangereux pour l'état nutritionnel des hommes et du bétail d'en être réduit à recycler seulement la biomasse (à travers les poudrettes, terre de parc, compost, paillage et jachère de plus en plus courte), laquelle traduit évidemment les carences minérales du sol (N, P, K et Ca + Mg sur les sols très acides). Un complément minéral, "bien emballé" dans le compost, est indispensable pour toute intensification de l'agriculture, ne fût-ce que pour permettre le développement de légumineuses capables de fixer l'azote de l'air.

La troisième circonstance favorable au réveil de l'intérêt pour des projets de CES, c'est la **croissance démographique** (taux de croissance 2,5 à 3,7 % par an, soit un doublement en 20 ans), comme conséquence de l'amélioration de l'hygiène et de l'alimentation. Jusqu'ici en Afrique de l'Ouest, les limites des terroirs villageois étaient mal connues, voire contestées... mais la terre était abondante et l'on accueillait tous ceux qui demandaient une terre à cultiver aux chefs traditionnels. Aujourd'hui, **les réserves foncières sont souvent**

épuisées. Au lieu d'étendre les surfaces cultivées sans trop se préoccuper de leur dégradation, il faut vivre de plus en plus nombreux là où l'on est, en tirant le meilleur parti des ressources naturelles.

Face à la pression foncière dans les campagnes africaines, trois stratégies sont généralement développées :

- Emigration d'une partie des enfants dans les zones plus humides où on valorise mieux le travail, soit pour la saison sèche, soit définitivement.
- Compléter les revenus agricoles par d'autres activités : artisanat, commerce, enseignement, etc...
- Améliorer la gestion du terroir, intensifier et diversifier la production en choisissant des spéculations plus rentables (élevage spécialisé, production fourragère, légumes, fruits, perches, bois de chauffage, pépinière ...).

Au Yatenga (N.O. du Burkina Faso), l'activité de certains projets de développement rural permet à quelques jeunes de trouver sur place les ressources suffisantes pour vivre décemment. Grâce à la vulgarisation et suite à la sécheresse ou à la pression foncière selon les zones, les paysans sont aujourd'hui plus perméables aux projets d'aménagements de terroir. Leur objectif est de protéger le capital foncier, mais surtout de gérer le peu d'eau disponible et les nutriments dispersés dans la biomasse, ou tout simplement, de prendre possession des terres. En effet, on ne sait plus très bien après les révolutions successives, si les terres appartiennent à la communauté villageoise, à l'Etat (par décret), à des citoyens munis d'un papier officiel, ou tout simplement à celui qui l'exploite après l'avoir aménagée.

Enfin, **les recherches ont aussi progressé** dans plusieurs domaines. Les chercheurs ont quantifié l'effet relatif des différents facteurs qui modifient l'expression de l'érosion. Ils ont montré que l'inclinaison de la pente était plus importante que la longueur de la pente dont l'influence est intimement liée à l'état de la surface du sol (en particulier sa rugosité). Enfin, dans certaines conditions, la position topographique est d'une importance capitale car le bas des pentes s'engorge rapidement par apport de ruissellement hypodermique des versants ou par remontée de la nappe à partir de la rivière. Enfin, dans certaines conditions (ex. sols argileux calcaires en région méditerranéenne), l'érosion en nappe sur les versants est moins importante que l'érosion ravinante régressive qui démarre des rivières, s'attaque aux riches terres alluviales, aux terrasses irrigables avant d'inciser les versants. Les travaux antiérosifs ne sont donc pas forcément à concentrer sur les versants raides. Le ruissellement peut être plus important sur les glacis peu pentus et limons battants que sur les versants raides bien protégés par une végétation herbacée ou par des pavages caillouteux (Heusch, 1970). La rivière peut gonfler lors d'une averse sans que les versants raides ne ruissellent (théorie de la contribution partielle d'un bassin au ruissellement : Cosandey, 1983 ; Campbell, 1983).

Le sol n'est pas forcément une "ressource naturelle non renouvelable". Certes, si on perd le mince horizon d'une rendzine couvrant une roche calcaire, cette terre sera perdue pour des millénaires et les eaux de ruissellement vont s'y concentrer. Mais si on respecte les six règles définies plus loin pour restaurer la fertilité d'un sol, on arrive en 1 à 5 ans à rendre vie et productivité à des sols complètement dégradés et abandonnés (ex. les sols ferrugineux tropicaux restaurés par le zaï au Burkina Faso).

La conservation des sols était jusqu'ici considérée comme un investissement à long terme pour protéger le patrimoine foncier pour les générations futures : c'est le thème de la cinquième Conférence de l'ISCO à Bangkok (Rimwanich, 1988). Avec la nouvelle stratégie de gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), on tente de répondre de suite aux problèmes urgents des paysans : assurer une nette augmentation de la production de biomasse et des revenus en améliorant la gestion des eaux de surface et des nutriments sur les meilleures terres, en restaurant les terres dégradées qui ont un avenir (profil suffisamment profond), en bloquant au meilleur coût les ravinements, et en captant les eaux de ruissellement pour créer des pôles d'intensification de la production agricole. Si le paysan doit être formé pour protéger son environnement, il faut rentrer dans la mentalité paysanne : tout effort doit être payé en retour, très rapidement.

Aujourd'hui, on constate aussi des **progrès sur le plan technique**. On admet par exemple, que les méthodes mécaniques de lutte antiérosive (terrassements, fossés, banquettes de diversion) ne sont pas la priorité : elles doivent être limitées au minimum, réduites aux méthodes les plus simples, les moins coûteuses en appui aux méthodes biologiques plus efficaces (Hudson, 1992). D'autres modes de gestion du ruissellement que la diversion proposée par Bennet pour les grandes cultures motorisées des Etats Unis semblent mieux adaptés aux conditions des petits planteurs africains.

L'agriculture sous impluvium en zone semi-aride, l'infiltration totale (paillage) ou la dissipation de l'énergie des eaux de ruissellement sur des talus enherbés, des haies vives ou des cordons de pierres, sont des modes de gestion de l'eau (et des nutriments) souvent mieux acceptés par les paysans, plus proches de leurs stratégies traditionnelles car elles permettent d'améliorer la sécurité, sinon le niveau de production.

Autre problème important : **le travail du sol**.

Le labour profond et la motorisation lourde sont remis en cause car s'ils permettent une augmentation immédiate de l'infiltration, de l'enracinement et des rendements (plus de 30 à 50 % sur les sols capables de stocker le supplément d'eau infiltrée), ils accélèrent la minéralisation des matières organiques du sol, détruisent la macroporosité stable et la structure, augmentent dans le profil les différenciations hydrauliques, réduisent la cohésion du sol (donc sa résistance au ruissellement) et à moyen terme (10 à 30 ans) accélèrent sa dégradation. Un grand effort est fait actuellement en Afrique comme ailleurs (Etats Unis, Brésil, Europe) pour mettre au point des systèmes de culture utilisant un travail minimum, réduit à l'éclatement du sol par des dents sur les lignes de plantation où sont aussi concentrés les apports d'engrais.

En zone soudanienne du Cameroun par exemple, il suffit de 10 à 15 ans de labour annuel + sarclage + billonnage sous une culture intensive de coton + céréales, pour provoquer la dégradation de sols ferrugineux tropicaux d'autant plus fragiles qu'ils sont sableux, pauvres en matières organiques (moins de 1 %) et exposés aux pluies violentes (Boli, Bep, Roose, 1991). Trente années de jachère, des brulis et du pâturages extensifs ne permettent pas une amélioration suffisante du niveau de fertilité du sol : le carbone passe de 0,3 à 0,6 %, l'azote reste autour du 1/10^{ème} du taux de carbone et le pH remonte d'une unité (5 à 6). Les animaux améliorent plus efficacement les qualités du sol : dans les turricules de vers de terre, les termitières de *Trinervitermes* et les anciens parcs de nuit des boeufs, le carbone atteint 1 % et le pH dépasse 6,5.

Il faut donc retrouver des systèmes de culture ressemblant aux systèmes forestiers où le sol n'est jamais totalement nu : il reçoit régulièrement des apports minéraux et organiques au niveau de la litière. Comme dans les systèmes de culture traditionnels, on tente aujourd'hui de réintroduire la variabilité spatiale à l'intérieur de la zone cultivée, de planter des arbres à enracinement profond qui ramènent en surface les nutriments dispersés, d'élever des animaux qui valorisent la biomasse et rassemblent les nutriments dispersés dans le paysage, et d'avoir des cultures associées à un sous-étage de plantes de couverture (adventices ou légumineuses en tapis).

Le terroir villageois aménagé n'est plus aussi strictement **découpé** en **zone forestière** (le bétail participe au sarclage, de même que certaines cultures intercalaires), en **zone de parcours** (les arbustes fourragers jouent un rôle important pour améliorer la qualité du fourrage surtout en saison sèche), en **zone d'habitation** (les jardins multiétagés très intensifs qui l'entourent sont une source importante de revenus) et en **zone de cultures** : les interactions positives entre les arbres, les animaux et les cultures sont nombreuses (voir les études de l'ICRAF. Egli, 1988; Buchy, 1989; Peltier, 1989; Young, 1990; Garrigue, 1990; Naegel, 1991).

C'est pour faire le point sur ces situations nouvelles et sur une nouvelle approche de la protection des agrosystèmes, qu'il nous a paru utile de présenter les données accumulées depuis 40 ans par les chercheurs francophones en Afrique, mais aussi en Amérique latine et en Europe. Les chercheurs anglophones ont eu beaucoup d'autres occasions pour publier leurs points de vue.

Dans une première partie, après avoir défini les termes dont nous aurons besoin, nous montrerons la diversité des situations en fonction des processus en cause, des échelles spatiales et temporelles considérées, des objectifs des acteurs et des conditions démographiques, sociologiques et économiques des paysans.

La deuxième partie est consacrée à une étude rapide des divers processus et plus détaillée de l'érosion "naissante", c'est-à-dire, l'érosion en nappe et rigole et l'érosion mécanique sèche.

L'analyse systématique des facteurs modérateurs de l'érosion présentée dans le cadre de l'équation de prévision des pertes en terre (USLE) de Wischmeier et Smith (1978) nous amènera naturellement à proposer un mode opératoire pratique pour définir la lutte antiérosive.

Enfin, dans une troisième partie, nous présenterons une série d'études de cas, en montagne tropicale à forte densité de population (Rwanda, Equateur, Algérie, Cameroun), en zone subéquatoriale (Côte d'Ivoire), tropicale semi-aride (Burkina-Faso, Mali) et en zone tempérée (France du Nord).

Il n'est pas question de nier ici **la part de responsabilité de l'Etat** dans l'aménagement du territoire, l'équipement rural, la reforestation des montagnes, la correction torrentielle, la protection des rivières, des barrages et autres ouvrages d'art (restauration des terrains en montagne : RTM), l'éducation des peuples au respect de leur environnement, la formation des techniciens spécialisés et la subvention de l'Agriculture en montagne pour éviter l'émigration. Mais il nous paraît opportun de compléter cette logique d'équipement

hydraulique par une logique de développement agricole du monde rural (paysans et éleveurs) qui rend solidaire les communautés paysannes face à l'entretien et même à l'amélioration de la gestion des ressources naturelles (eau + sol + nutriments) qu'elles ont reçues de leurs ancêtres et dont elles sont responsables devant les générations futures.

Le document est issu d'un cours "La GCES, comme instrument de gestion de terroir" donné depuis 7 ans à 600 ingénieurs agronomes, forestiers et techniciens hydrauliciens du CNEARC et de l'ENGREF à Montpellier (France), à l'ETSHER à Ouagadougou (Burkina) et en Haïti. C'est un document de base que nous souhaitons améliorer à mesure que les informations et les expérimentations se précisent. Il voudrait apporter des idées nouvelles, constructives, positives et pleines d'espoir aux agronomes des ONG et des Institutions nationales et internationales chargées d'améliorer sur le terrain, le niveau de vie des Hommes et la santé de leur Terre nourricière.



PREMIERE PARTIE

Les stratégies de lutte antiérosive et le concept de la GCES



Chapitre 1

Définitions : les mots cachent une philosophie

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 chacun dans sa discipline 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 antiérosive.

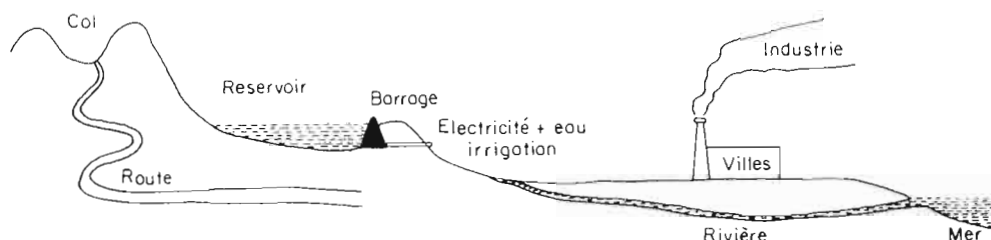
L'EROSION

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 TOLERANCE EN PERTE DE SOL

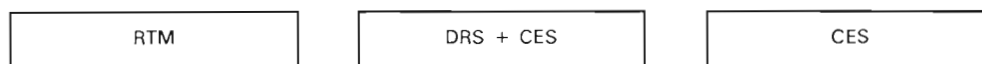
Dans le domaine de l'érosion, la tolérance a d'abord été définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols. Mais on s'est bien vite rendu compte que la productivité des horizons humifères, riches en éléments biogènes est bien supérieure à celle des altérites, roches pourries, 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

FIGURE 1
Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace : diversité des logiques et des acteurs

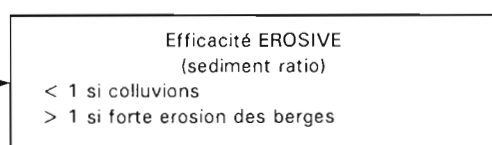
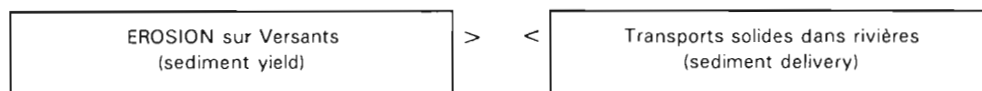


Lieux : Montagnes Piémont : Erosion + Plaines Littoral
Processus dominant : Arrachments Transports/Rivières Sédimentation/Pollution

Stratégies



≠ différents lieux ≠ stratégies ≠ disciplines ≠ objectifs des acteurs



Deux logiques



Objectif productivité de la terre
 = développement agricole
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 et des ouvrages d'art
Acteurs - Citadins + COOPERATIVE D'IRIGATION
 Pouvoir Central et Ingénieurs
 - Hydrologues + Sédimentologues
 - Equipement + Forestier
 Génie rural + Génie civil

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 (Stocking, 1978 ; Mannering, 1981).

LA DISCONTINUITÉ DE L'ÉROSION DANS L'ESPACE : DIFFÉRENTS ACTEURS, DEUX LOGIQUES

L'érosion résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases : le détachement des 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.

En montagne, lorsque la couverture végétale est détruite, le ravinement, les torrents et les glissements de terrain entraînent beaucoup de transferts solides qui causent d'énormes dégâts aux réseaux de communication : 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 les prairies ou les terrasses irriguées plutôt qu'à lutter contre l'érosion (voir les Cévennes et les hauts pâturages irrigués des Alpes, en France).

Dans les piémonts, 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 feux et les cultures de "rapine". Là encore, les forestiers tenteront de résoudre les problèmes d'envasement des barrages par la RTM et la DRS.

Enfin, dans les plaines, les problèmes concernent le plus souvent l'alluvionnement dans les canaux, les rivières et les ports, l'inondation des lits majeurs des rivières, le colluvionnement boueux de quartiers résidentiels (mal placés sous des 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, les acteurs de la dégradation des sols et les services concernés par la lutte antiérosive diffèrent, ainsi que leurs objectifs et les stratégies qu'ils développent. Il y a non seulement une grande variabilité dans l'espace des types d'érosion, mais aussi des acteurs de la lutte anti-érosive et des intérêts en jeu.

Sur les parcelles paysannes et sur les versants, les gestionnaires des terres, c'est-à-dire les paysans, les agronomes, les pédologues ou les géomorphologues, parlent d'érosion ou de

pertes en terre (sediment yield). Dans la rivière, les hydrologues ou sédimentologues parlent de transport solide (sediment delivery), transport solide en suspension (argiles, limons et matières organiques, MES), et transport de fond (sables grossiers et galets en charriage). 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 l'efficacité de l'érosion, "sediment ratio". 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. Les transports solides spécifiques ($t/km^2/an$) diminuent 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. En France, Ouvry, Boiffin, Papy et Peyre (1990) ont montré que l'érosion sur les limons battants du Bassin parisien ne devient inquiétante que lorsque sont réunies les conditions favorables à la concentration du ruissellement : sol fermé par les croûtes de battance, faible couvert végétal, période humide prolongée, grandes parcelles où le remembrement a effacé les structures de gestion du ruissellement.

Par contre, en montagne et là où la pente des émissaires est forte (ex. en région méditerranéenne), l'énergie érosive du ruissellement est supérieure à celle des pluies. Les pertes en terre sur les champs cultivés peuvent être faibles (0,1 à 15 t/ha/an : Heusch, 1970 ; Arabi et Roose, 1989) tandis que les transports solides dépassent 100 à 200 t/ha/an dans les ravines et les oueds (Olivry, 1989 ; Buffalo, 1990). Dans ce cas, plus le bassin versant est grand, plus le ruissellement concentré 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 les basses terrasses. Dans ce dernier cas, le rapport d'efficacité de l'érosion peut être supérieur à 1, l'érosion spécifique peut augmenter avec la taille du bassin versant (Heusch 1973).

LA VARIABILITE DE L'EROSION DANS LE TEMPS

- On distingue généralement **l'érosion normale ou géologique** (morphogénèse) qui façonne lentement les versants (0,1 à 1 t/ha/an) 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 la pédogénèse (vitesse d'altération des roches) et la morphogénèse (érosion, dénudation) (Kilian et Bertrand, 1974).
- Cependant, l'érosion géologique n'est pas toujours lente ! Dans les zones à soulèvement orogénique paroxysmique, les débits solides des rivières peuvent atteindre 50 t/ha/an (Indonésie, Népal, Andes Boliviennes) et jusqu'à 100 t/ha/an dans l'Himalaya qui se soulève à la vitesse de 1 cm par an. De même dans les zones tropicales soumises aux cyclones, la morphogénèse actuelle est très active, surtout si la couverture végétale a été dégradée (communication de Heusch, 1991) L'érosion géologique peut aussi agir de façon soudaine et **catastrophique à l'occasion d'évènements rares**, d'une succession d'averses qui détrempe le terrain ou encore lors d'activités sismiques ou volcaniques. On se souviendra des coulées boueuses en Colombie qui, en 1988, en une seule nuit, ont

DISCONTINUITÉ DES PROBLÈMES D'ÉROSION DANS LE TEMPS

L'érosion trouve son origine dans deux types de problèmes :

- | | |
|--|---|
| • DES PROBLÈMES GÉOLOGIQUES | • DES PROBLÈMES SOCIO-ECONOMIQUES |
| Lutte entre : | croissance de la population et des besoins |
| - Altération des couches superficielles des roches par l'eau et la biosphère
PEDOGENESE | EXTENSION des surfaces défrichées, pâturées, cultivées |
| - Erosion qui cisèle la surface de la terre
MORPHOGENESE | DIMINUTION de la durée des jachères |
| □ <i>ÉROSION GÉOLOGIQUE NORMALE</i> = 0.1 t/ha/an
Ruissellement = + 1 % | □ <i>ÉROSION ACCÉLÉRÉE</i> = 10 à 700 t/ha/an
Ruissellement = 20 à 80 % |
| DECAPER 1 mètre de terre prend 100.000 ans | 100 ans |
| □ <i>ÉROSION CATASTROPHIQUE</i> : 1 mètre en quelques heures ! | |
| □ RAVINEMENT : 100 à 300 t/ha/JOUR | |
| □ GLISSEMENT EN MASSE : 1000 à 10.000 t/ha/HEURE | |
| Exemple : Nîmes, l'orage du 3/10/1988 | a donné 420 mm de pluie en 6 heures
a causé 4 milliards de dégâts
la mort de 11 personnes |

CONCLUSIONS :

Les manifestations de l'érosion sont très discontinues dans le temps.

La Presse et le Pouvoir ne s'intéressent qu'aux catastrophes.

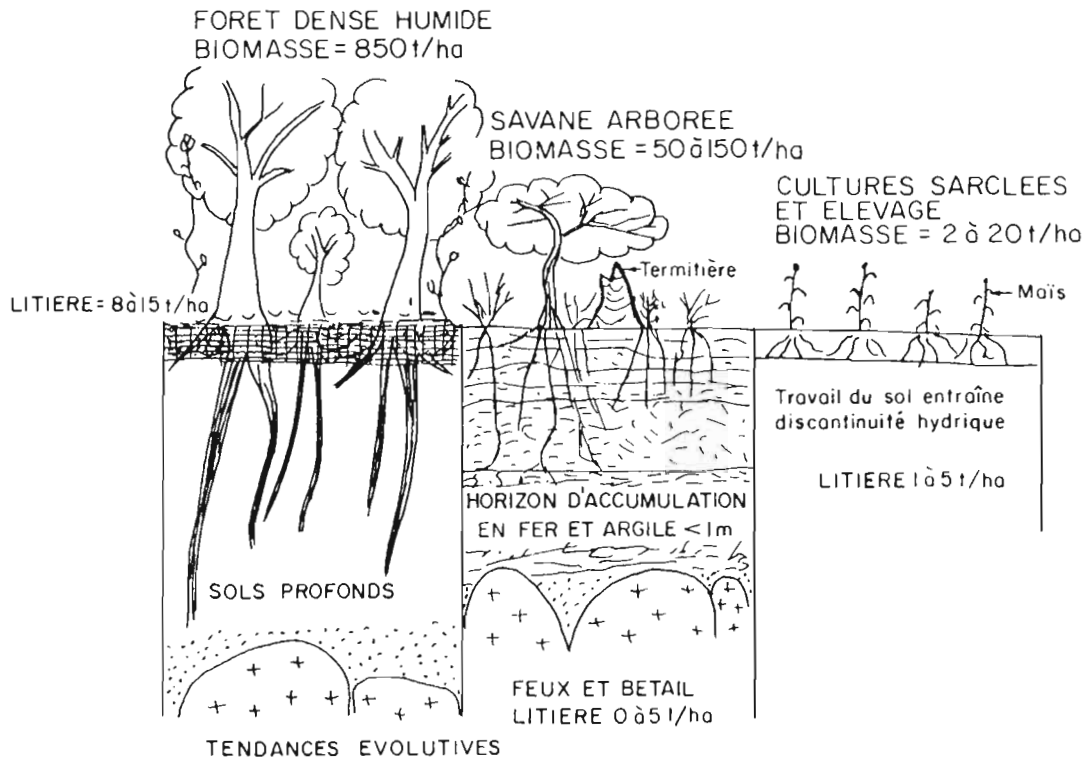
La GCES est d'avantage concernée par l'érosion accélérée, durant la phase initiale :

- l'érosion en nappe et rigoles, qui dégrade les bonnes terres des paysans
- la restauration de la productivité des sols profonds
- la gestion de la fertilité des terres d'avenir
- la valorisation des ravines aménagées et des eaux de surface.

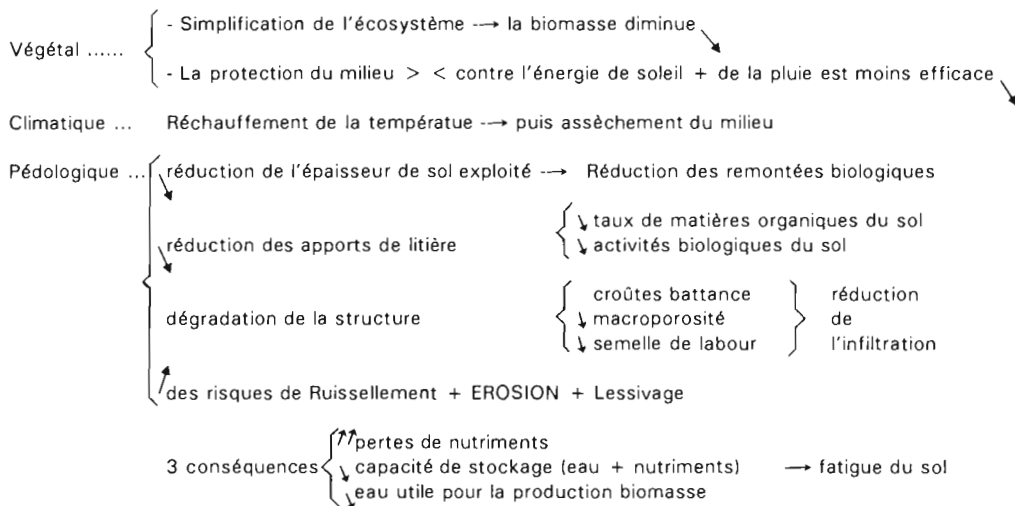
rayé de la carte une ville de 25.000 habitants (Nevado del RUIZ). Dans le sud tunisien, Bourges, Pontanier et leurs collègues ont mesuré à la citerne Telman, en moyenne, des ruissellements annuels équivalents à 14 à 25 % des précipitations, et des pertes en terre de 8,2 t/ha/an. Mais, le 12 décembre 1978, il est tombé une pluie de fréquence centennale de 250 mm 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 lave torrentielle 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 suite à des aménagements maladroits, déséquilibrant les versants.

FIGURE 2

Nature des problèmes : le déséquilibre du milieu "aménagé" entraîne la dégradation des sols, puis l'érosion l'accélère



Au point de vue



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

- **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 d'une 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 (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 le réseau hydrographique (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 (c'est la masse de particules que le fluide est capable de transporter), et **la compétence** d'un fluide (c'est le diamètre maximal des particules transportées en fonction de sa vitesse).

LA DEGRADATION DES SOLS [planche photographique 3]

La dégradation des sols peut aussi avoir diverses origines : salinisation, engorgement, compaction par la motorisation, minéralisation des matières organiques et squelettisation par érosion sélective. En zone tropicale humide, alors que l'érosion comprend trois phases (arrachement, transport et sédimentation), la dégradation des terres cultivées ne concerne que la déstabilisation de la structure et de la macroporosité du sol sans transport de particules à longue distance. Elle provient essentiellement de deux processus :

- **La minéralisation des matières organiques du sol** (d'autant plus active que le climat est chaud et humide) et l'exportation minérale par les cultures (non compensée par des apports de fumure) qui va entraîner la baisse de l'activité de la microfaune et de la mésofaune, responsables de la macroporosité.
- **La squelettisation ou l'enrichissement en sable 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, casse les mottes, arrache au passage des particules qui vont former alentour des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation favorisant le ruissellement.

Un exemple de la chaîne de la dégradation des terres tropicales est donné à la figure 2.

Sous **les forêts tropicales**, les sols sont très bien 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 redistribuée toute l'année), qui nourrit la mésofaune 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. 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 vigueur de la forêt (avec des arbres dominant à plus de 35 m de haut) peut faire illusion quant à 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 (Roose, 1980).

La savane compense déjà nettement moins bien 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 affronter 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 se substituent aux 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 bénéfique que celui des vers (Roose, 1975). Le ruissellement et l'évapotranspiration étant plus forts (à cause des croûtes de battance) et les pluies 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 régulièrement jusque dans l'horizon d'accumulation, mais beaucoup moins profondément que sous forêt.

Sous culture, comment évolue la situation après défrichage de la forêt ou de la savane ?

Au niveau du couvert végétal, 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 plantes en 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 sous culture, et l'énergie est moins bien amortie que sous forêt :

- 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 diminuent,
- 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 de 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. On connaît de nombreux exemples d'échec de culture "moderne" comme celle de la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux, en Casamance vers les années 50 (Charreau, Fauck, Thomann, 1970 ; Roose, 1967).

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 fermentée 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 progressifs de défrichement et des systèmes de production intensifs durables et équilibrés plus productifs que les systèmes traditionnels actuellement en place.

LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

La pluie et les apports occultes (rosée, brume : quelques dizaines à 150 mm par an) sont très variables dans l'espace en fonction de l'altitude, de la distance à la mer, de l'orientation des versants par rapport aux vents humides qui apportent la pluie.

Il faut enfin définir les différents termes du bilan hydrique (figure 3) :

$$\text{Pluie} = \text{Ruiss.} + \text{Drainage} + \text{ETR} \pm \text{Var. stock eau du sol}$$

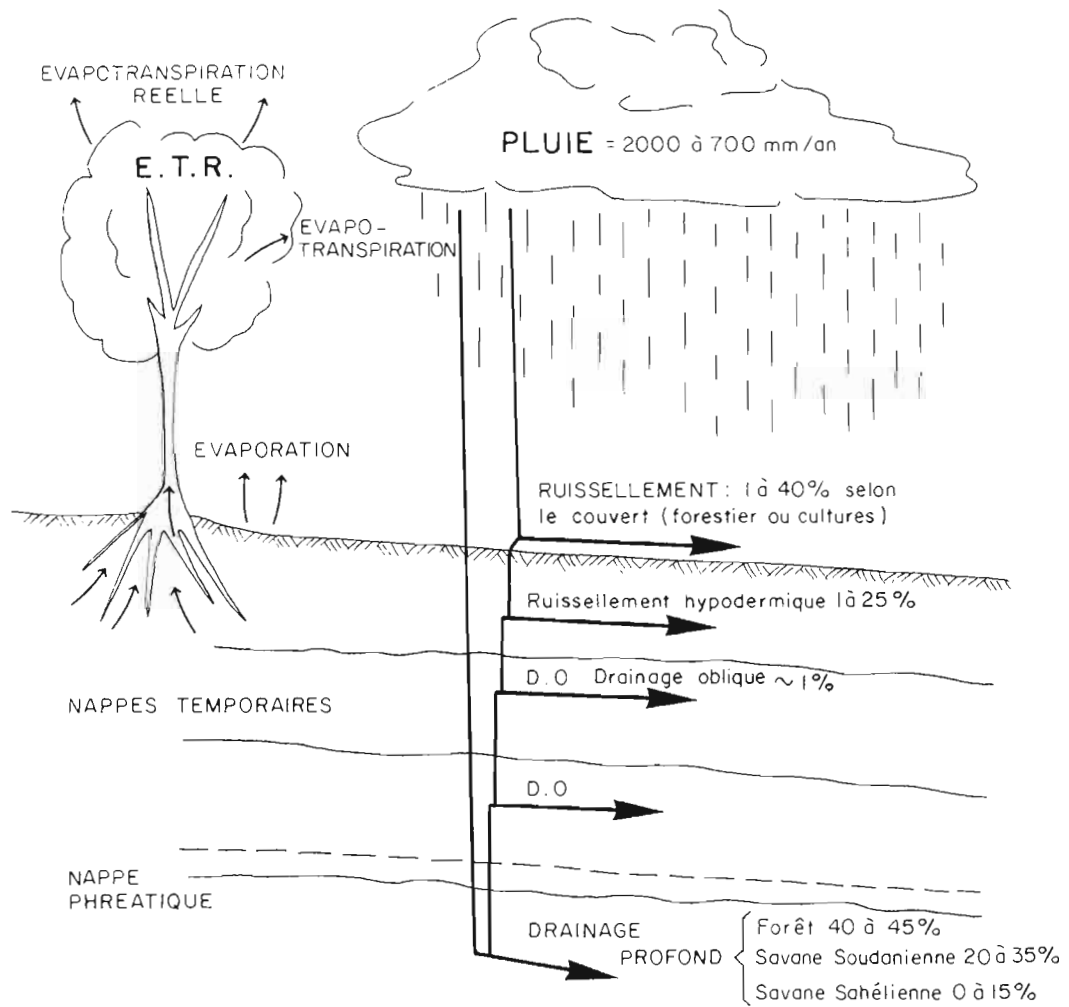
Le ruissellement superficiel est l'excès de pluie qui n'arrive pas à s'infiltrer dans le sol, coule à sa surface, s'organise en filets et rejoint rapidement la rivière où il provoque des débits de crue élevés après des temps de réponse relativement courts (de l'ordre d'une demi-heure pour des bassins d'un km²).

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 sur un bassin de 1 km²).

Enfin, **les nappes temporaires et les nappes phréatiques** (pérennes) entretiennent le débit de base des rivières grâce à un écoulement beaucoup plus lent : temps de réponse de plusieurs jours (sur un bassin de plusieurs km²), voire quelques mois sur les plus grands bassins.

En conclusion, l'érosion est un ensemble de processus variables 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 antiérosive intéresse divers acteurs dont les intérêts ne sont pas forcément compatibles. Il va donc falloir définir clairement les objectifs prioritaires des projets de lutte antiérosive 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, les industriels et les sociétés d'irrigation.

FIGURE 3
Bilan hydrique (d'après Roose, 1980)



$$PLUIE = RUISS. + DRAIN. + E.T.R. \pm VAR. STOCK DU SOL$$

Chapitre 2

Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive

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 des pluies. L'homme s'est donc entraîné à en réduire les effets néfastes.

Le développement de la production agricole entraîne une augmentation des risques de dégradation des terres :

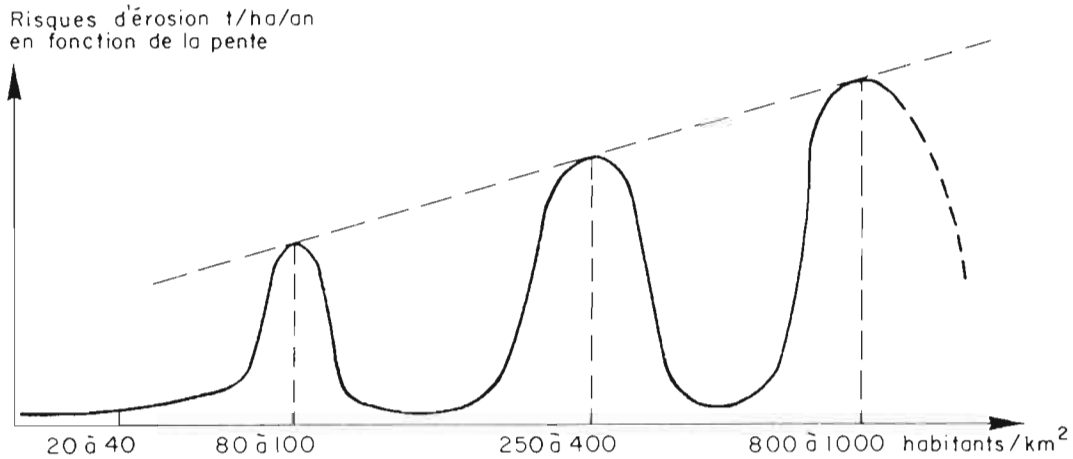
- soit par l'**extension des surfaces** à des terres neuves qui s'avèrent fragiles et s'épuisent au bout de quelques années de culture par minéralisation des matières organiques et exportation des nutriments sans restitution suffisante,
- soit **par l'intensification** et un usage inapproprié des intrants :
 - la fertilisation minérale intensive peut entraîner l'acidification des sols et la pollution des eaux (surtout si les apports sont déséquilibrés par rapport aux besoins des cultures et à la capacité de stockage par le sol),
 - l'irrigation diminue la stabilité de la structure des sols ou entraîne leur salinisation (en milieu aride),
 - la mécanisation, et surtout la motorisation, accélèrent 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).

Si la mise en culture augmente généralement les risques de dégradation du sol, les sociétés rurales tentent d'élaborer progressivement des méthodes permettant de maintenir à long terme la productivité des terres (amendements organiques ou calcaire, drainage, cultures associées). Mais lorsque les besoins évoluent trop vite, se développe une crise à laquelle la société rurale ne pourra répondre à temps. C'est justement le rôle de l'Etat que d'aider cette société à surmonter cette crise par des aides techniques (référentiels) et financières (subsides).

La dégradation des sols par érosion, acidification ou salinisation est probablement l'une des multiples causes qui ont entraîné la décadence de civilisations anciennes dès que la concentration des populations dans les campagnes et dans les villes entraîne une pression économique trop forte sur la production des campagnes (ex. la France du XIIe siècle,

FIGURE 4

Relation entre la densité de la population, l'érosion, le système de culture, le système d'élevage et la gestion de la fertilité



Densité pop. < 40	100 à 400	400 à 800	> 800 hab/km ²
Système de culture			
<ul style="list-style-type: none"> - cueillette - culture itinérante sur brûlis - culture de racines qq céréales 	culture extensive <ul style="list-style-type: none"> - racines - céréales mil - sorgho - arachide 	culture intensive <ul style="list-style-type: none"> - céréales - manioc, igname, patate - arachide, soja - bananier 	jardin multiétagé <ul style="list-style-type: none"> - arbres fruitiers - bananiers - racines - peu de céréales - haricots, soja
Système d'élevage			
élevage: <ul style="list-style-type: none"> - peu développé - qq poulets + cabris - séparé 	<ul style="list-style-type: none"> - troupeau villageois sur parcours extensifs - retour la nuit au parc 	<ul style="list-style-type: none"> - petit bétail : à l'étable au piquet + parcours ½ journée 	<ul style="list-style-type: none"> - petit bétail + parc - stabulation quasi permanente - eau à l'étable - cultures fourragères haies vives
Gestion de la fertilité			
<ul style="list-style-type: none"> - brève durée des rotations culturales - puis jachère arbustive longue - cendres 	<ul style="list-style-type: none"> - peu de poudrette (600 kg/vache/4 ha) - peu d'engrais minéral - durée des cultures ↗ - durée des jachères ↘ 	<ul style="list-style-type: none"> - poudrette + compost - plus de NPK - jachères courtes + parfois légumineuses - gestion des adventices 	<ul style="list-style-type: none"> - culture continue - fumier ou compost + NPK + Ca Mg CO₃ si pH < 5 + gestion des adventices et des légumineuses
Gestion des arbres			
<ul style="list-style-type: none"> - exploitation - puis jachère 	<ul style="list-style-type: none"> - défrichement accéléré - bois de village - rares arbres fruitiers 	<ul style="list-style-type: none"> - défrichement - haies vives - arbres en clôture - fruitiers 	jardin à 3 étages : <ul style="list-style-type: none"> - arbres forestiers - arbres fruitiers - cultures associées

l'Égypte actuelle). 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 qui intensifient l'exploitation des sols, accélèrent l'exportation des nutriments assimilables et la minéralisation des matières organiques, et repoussent les indigènes sur les terres les moins riches et les plus fragiles, réduisant la durée de la jachère. Il proposait une politique en trois points :

- la protection intégrale des parcs nationaux pour protéger les écosystèmes naturels,
- les travaux antiérosifs du type "terrasses", banquettes ou fossés aveugles,
- des recherches sur les techniques culturales et les systèmes de production équilibrés associant l'élevage, la forêt et l'agriculture, l'agroforesterie.

L'ÉROSION DES SOLS ET LA DENSITÉ DE LA POPULATION

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 : améliorer l'infiltration pour produire plus de biomasse, augmenter la couverture végétale du sol pour restituer plus de résidus organiques au sol et par là, réduire le ruissellement, l'érosion et le drainage qui amènent rapidement les sols tropicaux à l'épuisement. Dans ce contexte, la conservation des sols n'est plus le principal objectif brandi par les aménagistes, mais seulement un volet du "paquet technologique" permettant l'intensification de la production agricole indispensable pour faire face au principal défi de ce siècle : doubler la production tous les dix ans pour rattraper le rythme de la croissance démographique.

Certains auteurs prétendent que **l'érosion augmente en fonction de la densité de la population** (figure 4). Il est vrai que dans un système agraire donné, si la population dépasse certains seuils, les terres viennent à manquer et les mécanismes de restauration des sols se grippent (Pieri, 1989). Ainsi, en zone soudano-sahélienne, dès que la population dépasse 20 à 40 habitants/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 (ex. Burkina Faso).

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 sont contraints de changer de système de production. C'est le cas des zones soudano-sahéliennes sous l'impact de la longue sécheresse de ces vingt 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 antiérosives 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 et Rodriguez, 1990 ; Roose, Dugué et Rodriguez, 1992).

LES STRATEGIES TRADITIONNELLES DE LUTTE ANTIEROSIVE

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 (Lowdermilk, 1953). On constate que les méthodes traditionnelles sont strictement liées aux conditions socio-économiques.

La culture itinérante (shifting cultivation) est la plus ancienne 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 (envahissement des adventices et perte des nutriments les plus assimilables). Pour que le système reste équilibré il faut une réserve de terre considérable (environ 20 fois la surface cultivée). 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.

A l'opposé, **les gradins en courbe de niveaux** (bench terracing) ou les terrasses méditerranéennes irriguées apparaissent dès lors que la population est dense, que la surface cultivable est rare (hormis en montagne) et que le travail manuel est bon marché. Ces stratégies, qui demandent 600 à 1 200 jours de travail par hectare pour construire et entretenir ces structures, puis un immense effort pour restaurer la fertilité des sols, ne sont acceptées par les paysans que dans les cas où ils n'ont pas d'autre choix pour subsister, ou produire des cultures rentables. C'est le cas des Kirdis du Nord Cameroun, résistant à l'emprise de l'Islam, ou encore des Incas au Pérou, dans la région de Machu Pichu, qui, au 15^{ème} siècle, ont construit des terrasses en gradins remarquables pour se défendre contre les incursions des peuples de l'Amazonie ... puis des Espagnols (Guide Bleu du Pérou, Hachette : 246-247).

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 600 hab/km²) en combinant les cultures associées couvrant toute l'année de gros billons, à divers systèmes agro-forestiers.

Les alignements de pierres et les murettes combinés à l'entretien de la fertilité par la fumure organique. Comme d'autres ethnies en Afrique, 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 pour entretenir les jardins familiaux en milieux arides et sableux.

Le bocage ou l'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. L'élevage a été associé à la culture et les paysages ont été cloisonnés par une succession de bosquets, de petits champs et de prairies clôturées par des haies vives.

Mais actuellement, la mécanisation et l'industrialisation de l'agriculture, la crise économique et la désintégration des sociétés traditionnelles entraînent l'abandon de ces méthodes décrites avec admiration par des géographes et des ethnologues, mais méprisées par les experts "modernes" en conservation des sols qui les considèrent comme insuffisantes pour résoudre les problèmes d'aménagement des grands bassins versants (Critchley, Reij et Seznec, 1992).

Il faudrait, sans doute, reconsidérer ces positions et, sans vouloir idéaliser les stratégies traditionnelles, analyser leur aire de répartition, les conditions de leur fonctionnement, leur efficacité, leur coût, leur dynamisme actuel, et surtout développer les possibilités de leur amélioration.

LES STRATEGIES MODERNES D'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE DES CAMPAGNES

Plus récemment, se sont développées diverses stratégies modernes de lutte antiérosive orientées essentiellement vers l'amélioration foncière, l'exécution de travaux structurant le paysage (terrassements) et l'équipement hydraulique agricole. La priorité a été accordée à la réalisation de dispositifs mécaniques de gestion des eaux.

La restauration des terrains en montagne (RTM) 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 communication des dégâts des torrents, les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents par des techniques de génie civil et biologique. Il fallait faire face à une crise où les petits paysans

montagnards ne pouvaient survivre sans mener leur troupeau sur les terres communales qu'ils ont fini par dégrader des suites du surpâturage (Lilin, 1986).

La conservation de l'eau et des sols (CES) cultivés a été organisée aux Etats Unis d'Amérique depuis 1930 par des agronomes. 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 (dust bowl = ciel noir en plein jour) et par l'eau. En 1930, en pleine crise économique, 20 % des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous la pression de l'opinion publique, l'Etat a dû réagir. 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 pour aménager leurs terres ; les services centraux (agronomes et hydrologues) effectuent les études et les projets.

Sur le plan de l'approche du problème de la lutte antiérosive, 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 mécaniques de réduction de la seule 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.

Ces deux concepts ont été identifiés en France sur les terres de grande culture :

- l'un sur limons battants, surtout en hiver (sol fermé peu couvert),
- l'autre sur ces même terres, lors des orages au printemps, sur lits de semence et surtout sur des sols sableux (dans la Sarthe ou le Sud Ouest de la France).

A partir d'une analyse de fonctionnement de l'érosion et du ruissellement (causé par la saturation du milieu ou par l'état de surface battant), on arrive à évaluer le poids relatif des érosions aréolaires et linéaires et d'en déterminer les conséquences en terme de stratégie de lutte antiérosive (communication de Lilin, 1991).

La défense et restauration des sols (DRS) [planches photographiques 8 et 9] 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 défens 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 et une main-d'oeuvre locale abondante 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).

La préoccupation des forestiers était d'abord, de régénérer l'agriculture, et cela s'est fait dans le cadre de la "Rénovation Rurale" (Monjauze, 1964). Pour les forestiers, le concept DRS, de conservation ou de restauration des sols, était plus important que dans le cadre de la RTM.

Mais, cette opération s'est déroulée dans un contexte politique autoritaire (guerre d'Algérie) et la finalité sociale de lutte contre le chômage est devenue rapidement prioritaire (creusement de fossés) pendant que les autres moyens étaient bloqués par la situation politique (communication de Mura, 1991).

Toutes ces démarches n'ont pas été totalement inutiles, comme le laissent entendre certaines critiques, car sans elles, la dégradation des paysages serait sans doute pire encore. Cependant, on s'est mis à douter sérieusement du bien-fondé de la démarche de CES lorsqu'une enquête américaine a révélé que, finalement, l'érosion n'avait guère modifié la productivité des terres profondes. Dans bien des cas, on a prouvé que les sols étaient une ressource renouvelable, mais que leur restauration a un prix souvent incompatible avec la pression économique. Sous la pression démographique et la pression foncière, on connaît cependant des exemples au Burkina Faso, au Rwanda comme en Haïti, où des terres dégradées ont été restaurées en un temps record (un an).

LA GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU, DE LA BIOMASSE ET DE LA FERTILITE DES SOLS (GCES) [planches photographiques 24 et 25]

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'aménagement hydraulique menées trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (Lovejoy et Napier, 1986).

Aux Etats Unis, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de CES et des millions de dollars investis chaque année, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an, limite de tolérance sur les sols profonds. Si on n'a plus enregistré de vent de sable aussi catastrophique que dans les années 30, la pollution et l'envasement des barrages continuent de poser de graves problèmes. Pour améliorer l'efficacité de la démarche purement volontariste des paysans souhaitant protéger la productivité de leurs terres, l'Etat a promulgué des lois (sur la mise en culture des prairies, des marais et des terres fragiles), contraignant l'agriculteur à respecter des règles d'aménagements conservatoires, faute de quoi, il perd ses droits à tous les encouragements financiers destinés à soutenir l'agriculture américaine.

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 protection dont ils ignorent l'objectif (et la propriété) (Heusch, 1986).

Les raisons évoquées de ces 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).

UNE STRATEGIE FONDEE SUR LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE

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, sa fertilisation et les rendements, ou mieux, la marge bénéficiaire des paysans (Roose 1987). Cette méthode a été appelée "Land Husbandry" par Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer en 1988, et "La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols" par Roose en 1987.

La GCES prend pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et comporte trois 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 terroir" avec la communauté villageoise 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. L'enquête porte aussi sur les contraintes socio-économiques, facteurs limitants, statut foncier, crédit, formation et disponibilité en main d'oeuvre.
- 2° **Des expérimentations sur les champs** sont mises en place chez les 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 améliorée. Il s'agit d'établir un référentiel et de vérifier la faisabilité, la rentabilité et l'efficacité des méthodes antiérosives préconisées : l'évaluation doit être faite conjointement par les paysans et les techniciens.
- 3° Enfin, **un plan d'aménagement global** doit être défini après 1 à 5 ans de dialogue pour intensifier rationnellement l'exploitation des terres productives, pour structurer le paysage et pour fixer les ravines, stabiliser les terres en privilégiant les méthodes biologiques simples et 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.

En fonction des conditions socio-économiques locales (gros propriétaires à la pointe du progrès ou petits paysans luttant pour leur survie), les solutions seront bien différentes, même si le milieu physique est le même. Là, se trouve une différence majeure des approches développées jusqu'ici : la diversité des solutions en fonction des conditions humaines.

DE LA CONSERVATION DES SOLS A LA GESTION DE LA BIOMASSE ET DE LA FERTILITE DES SOLS

Récemment, il est apparu clairement que la conservation des sols qui se limite à réduire le tonnage de terre emportée par l'érosion ne pouvait satisfaire les paysans des régions tropicales.

En effet, les spécialistes ont proclamé longtemps qu'il faut **conserver les sols pour maintenir la productivité des terres**, "protéger le patrimoine foncier pour les générations futures" - (titre de la cinquième Conférence ISCO à Bangkok, 1988). C'est un devoir social et un **investissement à long terme !**

Les paysans (plus ou moins forcés) ont accepté de déployer des efforts considérables pour aménager leurs terres contre l'érosion, mais ils ont été déçus de constater que la terre continuait à se dégrader et les rendements des cultures à décroître. Les structures antiérosives imposées (fossés, banquettes de diversion, diguettes) ont souvent réduit la surface cultivable (de 3 à 20 %) sans pour autant améliorer la productivité des parcelles "protégées". **Si on veut motiver les paysans, conserver les sols en place ne suffit pas : il faut gérer l'eau et restaurer simultanément la fertilité des sols** pour augmenter significativement les rendements de ces sols tropicaux déjà très pauvres pour la plupart (en particulier les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, sableux en surface).

La GCES doit être rentable immédiatement : le défi est de doubler la production en 10 ans pour rattraper la croissance démographique. La CES est indispensable pour arrêter les pertes d'eau et de nutriments gaspillés par l'érosion et pour maintenir la capacité de stockage du sol. Mais la CES est insuffisante car le paysan a besoin d'être payé immédiatement de son effort pour protéger sa terre. Ceci est possible, tout au moins pour les sols suffisamment profonds, si on entreprend à la fois l'amélioration de la gestion des nutriments et des eaux de surface (drainage en cas d'engorgement, soussolage des croûtes calcaires ou des horizons tassés, labour grossier ou paillage si la surface s'encroûte).

En milieu traditionnel, c'est la **jachère longue** qui rétablit à la fois un bon état structural du sol, des teneurs suffisantes en matières organiques et la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes. Le brûlis peut remonter le pH de un ou deux points et supprimer la toxicité aluminique, surtout en zone humide. Mais, avec la croissance démographique et l'augmentation des besoins, la durée de la jachère a tant diminué qu'elle n'arrive plus à restituer la fertilité du sol. La mécanisation des techniques culturales a permis l'extension des surfaces cultivées plus que la croissance des rendements (Pieri, 1989). Dans de nombreuses régions, toutes les terres cultivables ont déjà été défrichées : il faut maintenant intensifier la productivité du capital foncier.

Dans un premier temps, l'intensification a été comprise par les paysans comme la réduction du temps de la jachère et l'extension des cultures à toutes les terres cultivables : les rendements moyens (600 kg/ha) se sont maintenus grâce au défrichement de nouvelles terres.

Dans un deuxième temps, l'encadrement rural a proposé le labour en culture attelée, les semences sélectionnées (en station) et traitées contre les maladies. La fertilisation minérale "vulgarisée" est restée très modeste (moins de 100 kg/ha de NPKCa). Les rendements sont passés de 600 à 1100 kg/ha (céréales, arachide, coton), mais le bilan des matières organiques

et des nutriments étant négatif, les sols se sont rapidement dégradés... ainsi que les rendements. On a cherché alors à améliorer la jachère et la production fourragère.

Enfin, des sociétés de développement ont proposé des systèmes de culture intensifs : coton et maïs en zone soudanienne ou arachide-mil en zones plus arides et plus sableuses. Ces systèmes combinent des apports plus importants d'engrais minéraux (plus de 200 kg/ha sur la culture de rente), le travail du sol (labour avec retournement et sarclage buttage), la traction bovine (qui suppose le démarrage d'une production fourragère et de fumier à l'échelle de chaque exploitation), des rotations où la jachère est exclue pendant 10 ans ou réduite à une culture fourragère (souvent légumineuse), des variétés sélectionnées répondant bien aux engrais, à l'usage régulier de pesticides et d'herbicides.

Les résultats furent encourageants, mais très variables en fonction des conditions pluviométriques, des types de sol et des conditions socio-économiques (Pieri, 1989). Les rendements des cultures ont été multipliés par 2 à 4 (1 500 à 2 500 kg/ha) et jusqu'à dix en station sur sols profonds à texture équilibrée. Mais au bout de 5 à 10 ans, l'amélioration du rendement par les engrais minéraux a diminué de 10 % par an. Le bilan des matières organiques du sol sous culture à fertilisation purement minérale reste déficitaire. En zone de savane, le stock d'humus du sol décroît de 2 % l'an sur les sols limono-sableux, de 4 % sur les sols très sableux ($A + L < 10 \%$) et jusqu'à 7 % si l'érosion et/ou le drainage sont importants.

L'enfouissement des résidus de culture - ou ce qu'il en reste au début de la saison des pluies (moins de 10 %) - ne suffit pas, d'autant plus que ces résidus sont valorisés ailleurs par le bétail ou l'artisanat. L'enfouissement de pailles grossières ($C/N < 40$ d'où une faim d'azote) ou d'engrais vert "excite", l'activité microbienne pendant quelques mois et accélère en définitive la minéralisation des réserves d'humus stable. Seul, l'apport de fumier ou de compost bien décomposé ($C/N < 15$) (3 à 10 t/ha/an) et complété d'un appoint minéral indispensable pour corriger les carences du sol, semble maintenir la productivité des terres : il maintient le taux de matières organiques du sol (donc la structure et le stockage de l'eau et des nutriments), évite l'acidification, favorise l'enracinement profond et les activités biologiques (micro et mésofaune) (Chopart, 1980).

L'érosion, le mauvais travail du sol (pulvérulent ou trop tardif) et l'apport d'engrais azotés, accélèrent l'épuisement du stock de matières organiques du sol. Par contre, la rotation entre divers types de culture, la fumure minérale complète, le travail du sol laissant une surface rugueuse, le travail minimum du sol sur la ligne de semis combiné à une litière de résidus sur la surface du champ, les jachères produisant une grande biomasse racinaire (*Andropogon*, *Pennisetum* ou légumineuses cultivées) retardent l'épuisement des matières organiques du sol.

Or, en zone tropicale sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux à argile kaolinique, les matières organiques du sol jouent un rôle majeur dans la protection de la structure du sol et de la capacité de stockage de l'eau et des nutriments. L'argile kaolinite n'ayant qu'une capacité d'échange de cation de 14 milliéquivalents par 100 grammes, n'apporte que 1 à 2 méq dans les horizons colonisés par les racines ($A + L \leq 20 \%$) : l'humus par contre, peut fixer jusqu'à 250 méq par 100 g.

Bien que les rendements des cultures ne soient pas directement liés aux taux de matière organique du sol, si on dépasse certains seuils ($Mo/[A + L] < 0,07$), la structure s'effondre, le ruissellement et l'érosion s'accroissent, l'enracinement est moins efficace car le sol se tasse, les nutriments sont moins accessibles. Un sol dégradé rentabilise moins bien les engrais car l'eau est moins disponible dans un sol compact (Pieri et Moreau, 1987).

On a cru un moment que grâce aux apports minéraux massifs comprenant la dose de correction des carences du sol (investissement tous les 4 à 10 ans) et la dose d'entretien (exportation par les récoltes), on allait résoudre tous les problèmes : augmenter les rendements et la biomasse disponible pour améliorer le taux de matière organique du sol. On avait oublié les risques d'acidification par l'azote et les autres engrais acides (sulfates et chlorures), les pertes par érosion et drainage, et surtout, la minéralisation rapide des matières organiques, accélérée encore dans les sols travaillés. Même si cet apport massif d'engrais est possible sur le plan technique, il n'est pas toujours rentable. Par exemple, on a montré qu'en bananeraie intensivement irriguée en basse Côte d'Ivoire sur des sols ferrallitiques très désaturés, on a perdu par érosion et surtout par lixiviation, 9 % du phosphore (P), 100 % de la chaux et du magnésium (1 tonne de dolomie) et 60 % de l'azote et du potassium (au moins 300 unités) pourtant répartis en dix doses annuelles autour de chaque pied (Roose et Godefroy, 1967 à 75). On a également constaté une tendance à l'acidification des sols sableux, en cas d'abus d'engrais azotés, de sulfate et de chlorure (Boyer, 1970).

Un nouveau virage s'est effectué lorsque les économistes de la Banque Mondiale ont exigé la **vérité des prix des engrais** pour réduire le gaspillage ! Les subventions aux engrais étaient destinées à réduire les coûts énormes du transport. Les supprimer, c'était interdire l'accès de cette technologie moderne aux petits paysans dispersés dans des milliers de villages. C'était supprimer une possibilité de valoriser leur travail. Il a donc fallu retourner aux ressources régionales (calcaires et phosphates naturels concassés) et aux ressources locales (la biomasse plus ou moins transformée). Cependant, on s'est bien vite rendu compte qu'on courrait vers un déséquilibre fatal entre les apports de nutriments, les fuites par érosion ou drainage, et les pertes par exportation des cultures (Breeman, 1991).

Les jachères forestières sont capables de puiser en profondeur des éléments nutritifs (issus de l'altération des minéraux, de la récupération des solutions drainant au-delà des racines des cultures) et de les recycler à la surface du sol (8 à 15 t/ha/an d'apport de litière). Il faut 8 à 20 ans dans la zone forestière subéquatoriale, 15 à 30 ans en zone forestière soudanienne et 30 à plus de 50 ans en zone sahélienne, pour reconstituer les sols. Par contre, la dégradation de l'horizon de surface est beaucoup plus rapide. En l'espace de 2 à 6 ans de cultures intensives, les réserves nutritives sont épuisées et en 15 à 20 ans, le milieu poral est dégradé et l'érosion sélective ne laisse en place qu'un horizon de sable. De plus, si le sol est carencé parce que la roche mère est pauvre en cet élément, la végétation le sera aussi, la litière et l'humus également, et l'on ne pourra échapper à un **apport minéral complémentaire**.

En savane, où la biomasse provient en grande partie d'herbes qui brûlent chaque année, la fertilité est concentrée par les animaux qui récoltent la biomasse dispersée sur les parcours (souvent des terres très pauvres impropres à la culture) et la restituent dans le parc de nuit sous forme de fumier. En réalité, il n'y a pas de fumier véritable (fermentation à 80° C qui tue les graines), mais de la "poudrette", déjections séchées au soleil et réduites en poudre par le piétinement des animaux maintenus dans un parc sans litière. Ce mélange de terre boueuse

et de matières organiques mal décomposées contient beaucoup de graines d'adventices et d'arbustes fourragers prêtes à germer. Cette matière peu organique a perdu malheureusement beaucoup d'azote, par gazéification au soleil puisqu'il manque de paille pour piéger l'azote et former de l'humus. On pourrait aisément améliorer la production de fumier en quantité et qualité en adoptant une forme plus ou moins poussée de stabulation des animaux sur une litière de paille (récupération des déjections liquides et diminution des pertes par drainage), à l'ombre d'un toit rudimentaire en attendant de disposer de la canopée des arbres. Le rôle des arbres, dans l'aménagement d'une fumière-compostière, est de créer une ambiance plus tempérée, de protéger la biomasse en fermentation des rayons directs du soleil, de réduire l'évaporation (donc les besoins en eau), de récupérer une partie de ces pertes de nutriments dans les eaux de drainage, et de produire une litière plus riche en éléments nutritifs que les pailles des graminées [planches photographiques 30 et 31].

Mais les apports de fumier par le bétail ont une limite. En système extensif, une vache donne 0,6 t/ha/an de poudrette, alors qu'il faut 3 t/ha/an de fumier pour entretenir le niveau de carbone du sol au-dessus du seuil critique. Il faut donc 5 vaches pour produire 3 tonnes et entretenir un hectare de cultures. Or, il faut 4 hectares de parcours extensif pour nourrir une vache : **il faut donc 20 hectares de parcours extensif pour entretenir par la fumure organique un hectare de terre cultivée**. On peut améliorer ces performances en élevage intensif. D'une part, en constatant qu'avec les résidus de la culture d'un hectare on peut entretenir une vache, ensuite qu'on peut produire jusqu'à 1,5 t de fumier par vache si on la maintient sur une litière pendant la nuit et les heures chaudes de la journée. Enfin, avec un hectare de culture fourragère intensive, on peut entretenir les deux vaches nécessaires pour produire les trois tonnes de fumier.

Mais, du point de vue du sol, la restitution par le fumier des nutriments compris dans la biomasse digérée par les animaux n'est que de **30 % à 40 %**. En effet, **toute transformation a un rendement**. Les meilleurs animaux fixent jusqu'à 70 % des nutriments contenus dans leur nourriture pour former des os (Ca + P), des protéines (N-P-S, magnésium et divers oligoéléments) qui seront en majorité perdus pour le sol. Il serait bon de ramener au sol les poudres d'os, de sang, de cornes, de sabots et autres produits animaux non utilisés ailleurs. On constate en réalité, dans les systèmes intensifs du Rwanda, où la densité de population dépasse 250 habitants/km², que **la fumure organique ne permet d'entretenir qu'un tiers de l'exploitation** (souvent moins d'un hectare pour nourrir 4 à 10 personnes), le reste du terrain étant réservé à des cultures très peu exigeantes, comme le manioc et les patates douces. L'élevage de petit bétail sur les terres communales et les chemins, est souvent le seul moyen pour les petits paysans, de survivre, d'amasser un petit capital pour parer aux besoins urgents de la vie (maladies, accidents) et aux relations sociales (mariages ou funérailles, etc...) (Roose *et al.*, 1992).

Le **compostage** est une filière encore plus longue pour transformer la biomasse (6 à 18 mois) et dont les rendements sont aussi faibles que pour le fumier. C'est pourtant une pratique valable pour ceux qui ne possèdent pas d'élevage (les paysans les plus pauvres) ou qui disposent de grandes quantités de déchets industriels (parche de café, drèches de brasserie, ou gadoues de ville, etc...). L'obstacle majeur est le travail nécessaire à la réalisation d'un bon compost. On a essayé de creuser des compostières au champ pour éviter le double transport des pailles et résidus de culture, mais la plupart sont restées vides et le compost est de mauvaise qualité. Les seules fosses efficaces sont les "compostières-fumières-poubelles", fosses proches de l'habitat, où sont entassés tous les résidus disponibles en même

temps que les cendres et les déchets du foyer. Pour que le mélange fermente avec moins de perte, on préconise des petites fosses (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 de compost par les eaux de drainage. Comme on ne peut produire qu'un maximum de 5 t/ha/an et par famille, soit (0,2 à 0,5 ha fumé par exploitation), il faut encore trouver des solutions complémentaires pour fumer l'ensemble de l'exploitation, mais c'est une bonne base pour démarrer les cultures maraîchères.

L'enfouissement des résidus et des adventices : on ignore souvent la masse des 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 à 3 mois) qui permet un recyclage rapide des nutriments contenus dans la biomasse. Il existe d'ailleurs diverses méthodes traditionnelles où l'on ramasse en tas les adventices pour les faire sécher, puis on les recouvre d'une butte de terre que l'on plante aussitôt de patates douces. A la récolte de celles-ci, la terre riche en matière organique est répandue alentour. 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 limitée. D'une part, les paysans exploitent de plus en plus cette biomasse pour l'élevage des animaux, puisque les jachères disparaissent. D'autre part, l'élévation de 1 % du taux de matières organiques du sol ne réduit que de 5 % l'érodibilité du sol (Wischmeier, Johnson et Cross, 1972). Or, il faut des apports considérables de matières organiques évoluées pour augmenter de 1 % le taux de carbone de 10 cm de sol (1 % de 1 500 tonnes de terre). L'enfouissement brutal de 15 tonnes de paille peu évoluée entraîne par ailleurs une faim d'azote (fixé par la masse microbienne) et réduit les rendements.

Le paillage épais (7 à 10 cm, ou 20 à 25 tonnes de paille par hectare) 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 la microfaune). La disparition de la litière est 30 % plus lente que lorsque la matière organique est enfouie par le labour. Les risques de carence en 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 de terre, les termites et autre mésofaune : les sols non dégradés sont tout à fait capables d'ingérer les matières organiques déposées à la surface. Sous caféiers et bananiers, le paillage a fait ses preuves : ce sont les parcelles les moins érodées, les moins dégradées des collines cultivées depuis longtemps. Malheureusement, on ne dispose pas d'une masse suffisante de résidus végétaux pour couvrir toutes les terres cultivées. Mais, **un paillage léger** (2 à 6 t/ha), répandu en début de saison des pluies, une fois le sol travaillé et semé, dissipe l'énergie des gouttes de pluie et celle du ruissellement et maintient plus longtemps une bonne infiltration en même temps qu'une bonne activité de la mésofaune. Même si le paillage ne couvre que 50 % de la surface du sol, il peut réduire de 80 % les risques d'érosion. Sur sol encroûté, il réduit bien l'érosion, moins le ruissellement. Mais de toutes façons, le paillage apporte des éléments nutritifs ainsi que des matières organiques fraîches à la surface du sol qui améliorent sa structure.

Aucune de ces méthodes de recyclage n'est parfaite. Elles doivent être combinées pour profiter de toutes les opportunités [planches photographiques 28 et 29].

L'agroforesterie [planches photographiques 18 et 19], et en particulier l'implantation de haies vives tous les 5 à 10 mètres, permet de produire une masse de fourrage et de paillage qui peuvent retourner au sol durant la culture. On utilise généralement des arbustes légumineuses ayant un enracinement profond et capables de produire entre 4 et 8 tonnes de matière organique sèche/ha/an (Balasubramanian et Sekayange, 1992 ; Ndayizigiye, 1992 ; König, 1992). Mais, malgré tous ces apports de matière organique, il est nécessaire de prévoir un **apport minéral complémentaire**. D'une part pour **amender** le milieu, amener le pH au-dessus de 5 pour supprimer la toxicité aluminique et permettre aux légumineuses de se développer ; d'autre part, **pour compenser les carences** du sol en fournissant directement à la plante les nutriments dont elle a besoin, où elle en a besoin et au moment où elle est capable de les stocker.

La correction directe des carences minérales du sol est souvent trop coûteuse et peu raisonnable tant que le système de stockage du sol n'est pas amélioré (matière organique et taux d'argile). On constate aussi dans bien des cas, une rétrogradation du phosphore en présence de fer et de calcaire, ou une rétrogradation du potassium si l'environnement comprend des argiles gonflantes (montmorillonites). Il existe aussi de nombreuses fuites dans les systèmes "sols" des zones tropicales humides. D'abord par érosion, ensuite par drainage, et enfin par gazéification. D'où les règles suivantes pour réduire les risques de lixiviation :

- fractionner les doses d'engrais (1/3 au semis, 1/3 au tallage ou à la montaison, et 1/3 à l'épiaison),
- apporter les amendements calcaires après la période des fortes averses,
- calculer les doses en fonction de la capacité du sol et des plantes à les stocker,
- choisir les nutriments sous forme assimilable pour les plantes,
- augmenter la capacité de stockage du sol par apport de matière organique ou d'argile à haute capacité de fixation (smectite gonflante),
- disposer les engrais sur toute la zone couverte par les racines,
- supporter l'activité d'une certaine couverture d'adventices, quitte à les rabattre en temps opportun pour former une litière (ces herbages vont fixer temporairement les nutriments susceptibles d'être lixiviés),
- équilibrer les apports en fonction des besoins des plantes et de la disponibilité du stock du sol.

Si les essais de production de biomasse en vases de végétation (témoin + NPK + NP + PK + NK) permettent de déceler l'importance relative des carences et les potentialités du sol, le bilan des exportations montre la quantité minimale de nutriments à apporter pour atteindre un objectif de production (Chaminade, 1965). Le suivi, au niveau des plantes (par analyse foliaire) et du sol (analyse de sol), est coûteux, mais permet de suivre l'alimentation des plantes et les carences du sol. Le mode d'échantillonnage est fondamental pour obtenir des résultats significatifs (Pieri, 1989 ; Boyer, 1970).

LA RESTAURATION DES SOLS ET LA REHABILITATION DES TERRES

Avec la pression démographique, les périodes de sécheresse et le surpâturage que connaissent de nombreuses régions tropicales semi-arides, la couverture végétale a été dégradée et les sols ont été appauvris en matières organiques, en nutriments et en particules fines (érosion sélective), éventuellement acidifiés puis décapés, déstructurés, encroûtés par la battance et compactés en profondeur suite au travail du sol et à la minéralisation des matières organiques. Il existe donc des surfaces stérilisées importantes dans les terroirs (5 à 20 %), non productives, mais qui génèrent une grande quantité de ruissellement, à l'origine des problèmes de ravinement dans les bonnes terres de culture à l'aval.

Jusqu'ici, ces terres dégradées étaient confiées aux forestiers en vue de leur restauration. Ceux-ci s'empressaient de les mettre en défens (c'est à dire de les protéger contre les feux de brousse, contre les éleveurs coupables du surpâturage et les agriculteurs qui ont défriché ces terres fragiles), d'y planter quelques espèces pionnières d'arbres et de gérer les eaux de surface à l'aide de banquettes ou de fossés de diversion. Les gens et les bêtes étaient priés de vivre ailleurs, sous peine d'amendes : d'où les tensions bien connues entre forestiers, éleveurs et agriculteurs! La mise en défens est une méthode souvent très efficace si la dégradation végétale n'est pas trop poussée, mais elle est difficile à faire respecter lorsque la pression démographique est forte : son efficacité diminue en zone aride.

Dans le cadre de la GCES, il semble plus efficace et plus rentable pour les paysans de **s'attacher à l'aménagement des bonnes terres en production avant qu'elles se dégradent**, car on obtient une augmentation des rendements plus rapide et plus nette sur les terres profondes que sur les terres caillouteuses épuisées. "Mieux vaut prévoir que guérir !". Cependant, il existe quelques cas où la restauration des terres dégradées est prioritaire pour les populations :

- la réhabilitation des terres caillouteuses (terres finies disent les haïtiens) de sommet de colline, car le ruissellement qui s'en dégage ravine les bonnes terres cultivées à l'aval ;
- la restauration des terres dégradées, mais qui ont encore un avenir agricole, une possibilité de stockage de l'eau et des nutriments dans un profil suffisamment épais pour assurer le cycle cultural malgré les aléas climatiques (plus de 30 cm de sol argileux, plus de 60 cm de sol sableux) ;
- lorsque la pression foncière se fait sentir, il faut à tout prix non seulement restaurer, mais créer des sols producteurs là où la roche peut collecter les eaux de pluie (cas des Dogons au Mali).

LA REHABILITATION DES TERRES EN VUE D'UNE EXPLOITATION EXTENSIVE DES RESSOURCES NATURELLES

Il s'agit d'intervenir légèrement pour favoriser la recrudescence du couvert végétal sans modifier profondément les caractéristiques du sol :

- amélioration du stockage de l'eau en zone semi-aride sableuse par un rouleau "imprinter" qui creuse de petites dépressions (pitting) où sont piégés l'eau de ruissellement, le sable et les graines poussées par le vent (Dixon, 1983) : cette méthode

TABLEAU 1

Recouvrement des sols dégradés à l'abri du pâturage (d'après Hijkoop, Poel et Kaya, 1991)

Traitement	Recouvrement du sol en %		% de graminées en 1989
	après 1 an	3 ans (1989)	
Bande de 1 mètre de tiges de coton	45	98	70
Cordons pierreux (h = 20 cm, l = 30 cm)	48	98	74
Diguettes en forme ½ lune	2	52	62
2 lignes de boutures <i>Euphorbia balsamifera</i>	0	0,5	50
Travail + semis de <i>Cenchrus ciliaris</i>	0,5	0,5	+
Témoin	0	0	-

est efficace sur les zones sableuses, mais très peu sur les vertisols dégradés (Masse, Pontanier, Floret, 1992) ;

- le travail grossier ou le soussolage croisé avec semis direct d'herbes pérennes ou d'arbustes fourragers : cette méthode a un effet temporaire au Niger (Chare *et al.*, 1989), peu d'effet au sud du Mali sur bourrelet de berge dénudé (Pluie = 700 mm) (Poel, Kaya, 1989), au nord Ouest du Burkina (Roose, Dugue, Rodriguez, 1992) sur glacis gravillonnaire (Pluie = 500 mm) et au Nord Cameroun sur sol vertique dégradé (Masse, Pontanier, Floret, 1992) ;
- mise en défens contre le feu et le pâturage : bonne efficacité sur les sols encore couverts en partie, à Gonsé au Burkina (pluie ≈ 700 mm) (Roose et Piot, 1984 ; Roose, 1992) et à Kaniko au Mali (Poel et Kaya, 1989), mais sans intérêt si le sol est totalement dénudé et encroûté (Poel et Kaya, 1989) ;
- épandage de brindilles et d'écorces d'arbres (Chase et Boudouresque, 1989 au Niger), de tiges de coton (Poel et Kaya, 1989 au Mali — tableau 1) ou de tiges de sorgho (Roose et Rodriguez, 1990 au Burkina) : c'est la méthode la plus efficace pour piéger les graines et le sable poussés par le vent et pour attirer la mésofaune qui va rétablir la capacité d'infiltration du sol en perforant la croûte de battance ;
- cordons de pierres isohypses, lignes de pailles, d'herbes, de cailloux et de branchages agissent de la même façon que les précédents, mais ne provoquent la recrudescence de la végétation que sur trois mètres de part et d'autre de l'obstacle perméable qui ralentit le ruissellement et favorise la sédimentation ;
- les haies d'*Euphorbia balsamifera* ont du mal à survivre sur les sols profondément dégradés et acides de Kaniko (Poel et Kaya au sud du Mali) ; par contre, des haies d'*Opuntia*, en Algérie, ziziphus, d'acacia et divers épineux au Burkina, ont bien fixé le terrain... à l'abri du bétail (Roose *et al.*, 1992) ;
- les diguettes en terre et demi-lune ont une durée de vie éphémère et permettent seulement l'installation de graminées dans la zone d'accumulation des eaux de

ruissellement, au Burkina (Roose, Dugué, Rodriguez, 1992) et au Mali (Poel et Kaya, 1989) ;

- sur les vertisols dégradés du Cameroun, seul l'isolement de casiers par des bourrelets de terre a permis une légère amélioration de l'infiltration... et de la production de céréales (Masse, Floret, Pontanier, 1992) ;
- si la zone est parcourue par le bétail en saison sèche, la biomasse sera moins abondante et les espèces survivantes seront différentes (Chase *et al.*, 1989) (Poel et Kaya, 1989).

LA RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITE DES TERRES AGRICOLES

Lorsqu'il s'agit de sols profonds et sains, mais qui ont été décapés par l'érosion ou dégradés par des cultures n'équilibrant pas le bilan des matières organiques ni des nutriments, il est rare que l'application d'une seule approche, biologique, physique ou chimique, donne satisfaction. Par contre, dans les zones tropicales semi-arides et surtout semi-humides et humides, la restauration de la productivité des sols peut être très rapide (1 à 4 ans) à condition de bien respecter les six règles suivantes (Roose *et al.*, 1992) :

SIX REGLES A RESPECTER POUR LA RESTAURATION DES SOLS

- 1° Si le sol est décapé par l'érosion, il faut avant tout se rendre maître du ruissellement (cordon de pierres, haies vives, etc...).
- 2° Si le sol est compact, il faut réaliser un travail profond pour restaurer la macroporosité de la couverture pédologique.
- 3° La structure étant généralement instable, il faut en même temps enfouir un stabilisant (de la matière organique bien décomposée, du gypse, de la chaux) et semer une végétation produisant un enracinement profond et une biomasse exubérante capable de stabiliser les macropores du profil (ex. sorgho, *Stylosanthes*, *Pennisetum*, maïs, etc...).
- 4° Si l'horizon superficiel a été appauvri ou décapé, il faut réintroduire une microflore et une mésofaune susceptibles de remettre en route l'évolution positive de la structure et l'assimilabilité des nutriments minéraux (fumier ou compost bien décomposés).
- 5° Si le sol est acide, il faut amender le sol jusqu'à ce que le pH dépasse 5 et que la toxicité aluminique et manganique soit écartée.
- 6° Enfin, corriger progressivement les carences minérales du sol en alimentant les plantes cultivées à leur rythme et en emballant le complément minéral (N et P) dans la fumure organique pour éviter sa lixiviation par le drainage ou son immobilisation par le fer ou l'alumine libre.

La jachère de hautes graminées exubérantes peut éventuellement améliorer les propriétés physiques des sols riches pas trop dégradés par les cultures en climat soudano-guinéen (Morel et Quantin, 1972). Par contre, en zone soudano-sahélienne, on ne peut attendre d'une jachère

FIGURE 5

Le Zaï : méthode traditionnelle de restauration des sols (d'après Roose et Rodriguez, 1990)

Décembre à avril

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

Avril à juin

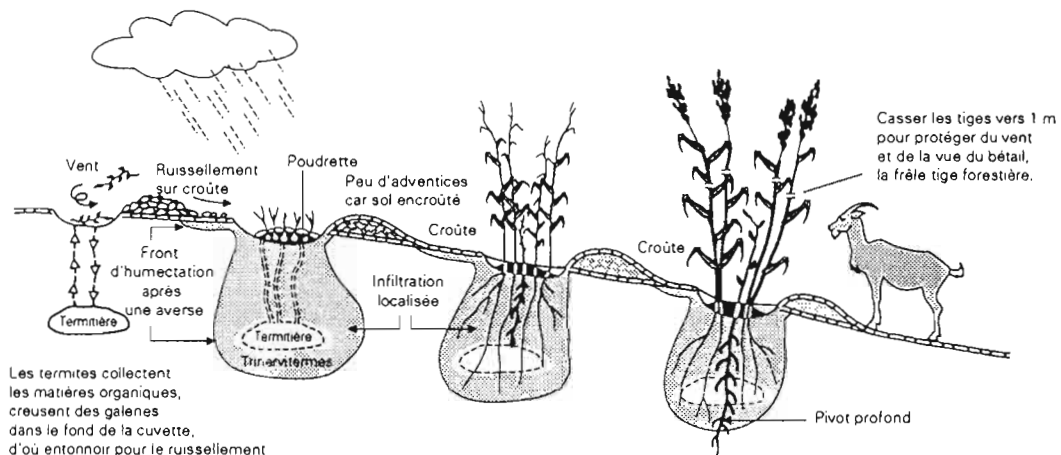
- Après la première pluie, apport de 2 poignées de poudrette (= 3 t / ha).
- Les termites y creusent des galeries enrobées d'excréments.
- Semis en poquet à la deuxième pluie.
- Eau infiltrée, stockée en profondeur à l'abri de l'évaporation directe.

Juin-juillet

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

Novembre

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



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

naturelle herbacée de courte durée (2 à 6 ans après 2 à 3 ans de culture) un maintien et, *a fortiori*, une restauration de la productivité agricole des terres (Pieri, 1989). Sur un sol ferrugineux tropical sableux de la région de Tcholliré au Nord Cameroun, Roose (1992) a constaté que les teneurs en carbone (0,3 à 0,6 %) et en azote (0,01 à 0,06 %) et le pH (5,3 à 6) s'étaient peu améliorés au bout de 30 ans de jachère brûlée et pâturée extensivement chaque année. Les meilleures situations (C = 1 %) proviennent des turricules des vers de terre, des termitières et des déjections animales concentrées dans un ancien parc où l'on réunit le bétail la nuit. La capacité d'infiltration par contre, s'est nettement améliorée sur la vieille jachère grâce aux racines et aux galeries creusées par les vers de terre et les termites.

Un excellent exemple de restauration rapide de la productivité des terres dégradées (Zipellé en Mooré) est donné par la méthode traditionnelle mossi qu'on appelle le Zaï et ses variantes comme le zaï forestier (figure 5). En saison sèche, le paysan creuse dans les parcelles dégradées (zipellé) des cuvettes (40 cm de diamètre, 15 cm de profondeur) tous les 80 cm en rejetant la terre vers l'aval. Le vent sec du désert (Harmattan) y pousse divers résidus organiques qui seront bientôt attaqués par les termites. Ces termites (*Trinervitermes*) creusent des galeries qui percent la surface encroûtée du sol et permettent aux premières pluies de s'infiltrer en profondeur hors d'atteinte de l'évaporation directe.

Deux semaines avant le début des pluies (15 mai à 15 juin), le paysan répand une à deux poignées de poudrette (1 à 2,5 t/ha de fumier sec) au fond des cuvettes et les recouvre de terre pour empêcher les matières organiques sèches de flotter et d'être emportées par le ruissellement.

Certains sèment en poquet avant les pluies, d'autres après la première averse une douzaine de graines de mil si le sol est léger, ou de sorgho si le sol est limono-argileux (environ 8 kg/ha de semence).

Les premières averses ruissellent abondamment sur les surfaces encroûtées (2/3 du terrain) : les cuvettes captent ce ruissellement (de quoi mouiller une poche de sol sur un mètre de profondeur). Les graines germent ensemble, bousculent la croûte de battance et envoient des racines en profondeur où elles trouvent à la fois les réserves d'eau et les nutriments redistribués par les termites. Grâce à la concentration en eau et en nutriments autour du poquet, les rendements peuvent atteindre 800 kg/ha dès la première année et augmenter progressivement durant 30 ans à mesure que l'ensemble du champ s'améliore.

A la récolte, il laisse sur place les tiges coupées vers un mètre de haut : elles vont réduire la vitesse du vent et piéger les matières organiques poussées par le vent.

La deuxième année, ou bien le paysan trouve le temps de creuser de nouvelles cuvettes entre les premières et d'y apporter du fumier, ou bien il arrache la souche et resème dans la même cuvette. Les souches posées entre les cuvettes vont être à leur tour attaquées par les termites. Au bout de cinq ans, toute la surface a été remuée et fumée de telle sorte que le sol est assez souple pour être labouré normalement. Selon certains paysans, les terrains restaurés par le zaï peuvent être cultivés pendant plus de 30 ans.

Une variante, le "zaï forestier", semble particulièrement intéressante. Dans la poudrette (fecès non fermenté séché), subsistent quantité de graines forestières prêtes à germer après le passage dans le tube digestif des chèvres. Certains paysans astucieux ont remarqué que,

dans les cuvettes, poussent des arbustes fourragers, légumineuses à gousses pour la plupart : lors du sarclage, ils conservent deux plantules forestières tous les trois mètres, lesquelles vont profiter de l'eau et de la fumure destinées aux céréales. A la récolte, les tiges de sorgho sont coupées vers un mètre et protègent ainsi le sol de l'érosion éolienne et les jeunes tiges forestières de la vue des chèvres (voir figure 5). La culture de céréales se renouvelle chaque année, 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 les parcs à *Acacia albida* et autres légumineuses capables de maintenir la production de céréales tout en fournissant du fourrage, de la litière et du bois. Ce zaï forestier peut aussi être utilisé pour implanter des haies vives.

Trois problèmes limitent l'extension du zaï : le travail très dur en saison sèche (environ 250 jours à raison de 4 heures par jour), la nécessité de maîtriser le ruissellement par un cordon pierreux entourant la parcelle, et la disponibilité en fumier. En préparant le terrain en décembre, lorsque les boeufs sont encore bien nourris par les résidus de culture, les températures sont encore fraîches le matin et les sols pas trop durs ; un sous-solage croisé peut réduire de moitié les temps de travaux. Si on manque de fumier, des branchettes 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 la production de fumier ou de compost plutôt que par le paillage. Il faut noter cependant que sous terre, il est encore plus facile aux termites de s'attaquer au fumier, mais c'est moins apparent. Cette méthode pourrait être encore améliorée par des apports complémentaires d'azote et de phosphates, tous deux déficitaires à la fois dans le sol et dans les poudrettes (gazéification par exposition au soleil). Voilà une méthode de restauration des sols et de reforestation traditionnelle orientée vers l'agroforesterie et bien adaptée aux zones des glacis soudano-sahéliens fortement dégradés depuis les périodes de sécheresse (Roose et Rodriguez, 1990).

L'AMENAGEMENT DES TERRES DECAPEES JUSQU'A LA ROCHE

- **Si les roches sont dures, très lentes à s'altérer** et le stockage de la couverture pédologique très faible, la meilleure utilisation en zone semi-aride (à une saison sèche au moins), est de gérer ces parcelles comme un impluvium, de capter les eaux de ruissellement dans un caniveau ou une piste bétonnée qui les rassemble dans une citerne creusée dans le sol et imperméabilisée (crépis). Après désablage, ces eaux de ruissellement serviront à abreuver le bétail, aux usages ménagers et à l'irrigation d'appoint de petites parcelles de culture intensive de légumes et autres produits très rentables hors saison des pluies. Des exemples de cette stratégie d'intensification localisée ont été développés en Haïti (Smolikovski, 1990) et au Burkina (Roose, Rodriguez, 1990) (voir figures 37 et 38).
- **Si les roches sont tendres** (grès tendres, schistes, argillites, marnes, etc...) ou s'altèrent rapidement (basaltes et autres roches volcaniques ou grenues), il est difficile de couvrir l'ensemble de la surface parce que le sol est trop peu épais, trop pentu et décapé lors des plus fortes averses. Par contre, il est possible d'appliquer la "stratégie du pot de fleurs" qui consiste à concentrer localement l'eau, les nutriments disponibles et les soins à quelques plantes intéressantes localement. Il s'agit de creuser tous les 5 à 10 m une fosse de 1 m³ minimum, de mélanger dans le fond le peu de terre minérale dont on dispose à deux poignées d'engrais complet, un seau de fumier/compost/tourbe bien

décomposé, d'y planter un bananier ou un arbre fruitier intéressant et en bordure, une série de plantes (légumineuses de préférence) rampantes qui vont envahir progressivement l'espace entre les plages de culture intensive. Il reste à organiser les écoulements superficiels vers la fosse, le drainage des excédents éventuels, et à déverser dans la fosse autour des arbres, les cendres et tous les résidus végétaux susceptibles d'évoluer en compost. Un exemple classique de cette stratégie peut être admiré sur les îles Canaries, où des vignes sont plantées au fond de fosses creusées dans un champ de lave.

- **Le système Van der Poel et Kaya (1989).** Il cherche à combiner la régénération de la végétation naturelle (enherbement) avec des plantations plus profitables aux paysans. Il propose de confectionner tous les sept mètres, des cordons de pierres ou des bandes de tiges de coton en courbe de niveau et de planter dans l'intervalle, par semis direct dès le deuxième hivernage, une ligne d'*Anacardium occidentale*, espèce frugale bien adaptée aux sols ferrugineux tropicaux qui peut fournir d'excellents coupe-feux car son feuillage épais arrive à étouffer toutes les herbes. Pour améliorer le taux de reprise et la croissance de ces arbres fruitiers, on peut faucher les herbes poussant sur les "bandes d'arrêt" et les disposer comme paillage autour des arbres. Ce système exige évidemment la mise en défens de la parcelle, ce qui peut s'obtenir en expliquant l'aménagement aux bergers du village (+ marquage coloré sur les troncs des arbres environnants). L'ensemble du dispositif réduit le ruissellement et les risques d'érosion à l'aval, tout en restaurant progressivement la productivité des terres (fourrages, fruits et bois). Ce système ressemble un peu aux "brousses tigrées" qui associent une zone dénudée encroûtée où se forme le ruissellement qui va irriguer une zone de brousse (herbe + arbustes) qui profite de ce complément d'eau. Il permet d'imaginer toute une série de variantes adaptées à chaque zone semi-aride en fonction du type de sol, de végétation et des besoins des gestionnaires des terres.
- **La réhabilitation agricole des sols sur cendres volcaniques durcies** (tepetate) au Mexique. Quantin (1992) et un groupe de chercheurs financés par la CEE ont étudié la réhabilitation de "tepetate" ou cendres volcaniques durcies dont l'horizon humifère a été sérieusement décapé. Pour rendre à ce matériau stérile sa capacité de production agricole, on a procédé à différentes techniques culturales préliminaires :
 - passage croisé d'une soussoleuse tirée par un chenillard qui enfonce les dents jusqu'à 50 cm tous les 60 cm de distance ;
 - nivellement de terrasses en pente isolées par des ados et des fossés ;
 - succession de labours et de pulvérisages pour réduire les blocs de cendres durcies à 3-5 cm de diamètre.

L'élevage étant extensif sur parcours, les fermiers disposent de peu de fumier, à peine assez pour fumer 0,5 à 1 hectare. Le coût du travail du sol revient à 8 000 FF/ha. Si l'on plante du maïs la première année, les rendements sont très faibles, même si on répand du NPK seul ou avec un peu de poudrette de parc.

Par contre, le blé peut donner 15 q/ha dès la première année si on apporte du NPK, seul ou avec poudrette. Dès la troisième ou la cinquième année, les problèmes biologiques disparaissent et les rendements atteignent normalement 60 quintaux/ha/an si les conditions climatiques sont favorables. Si le paysan ne rembourse que les frais bruts,

l'opération de réhabilitation d'une terre dégradée est rentabilisée au bout de huit ans. Les nouveaux sols fumés ont une meilleure infiltration et sont plus stables, moins érodibles que les sols cultivés originaux.

CONCLUSIONS

Le développement des sociétés humaines pose forcément des problèmes de dégradation des ressources naturelles. Pour faire face à ce défi, les sociétés rurales ont mis au point des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols en équilibre avec le milieu physique et socio-économique de leur époque. Actuellement en déclin, ces méthodes traditionnelles ont été trop souvent ignorées, voire méprisées par les experts en CES, mais il serait utile d'étudier leur fonctionnement et leur dynamisme car elles peuvent servir de point de départ au dialogue avec les paysans pour une amélioration durable de leur environnement.

Face aux énormes problèmes de protection du patrimoine foncier, des ouvrages d'art et de la qualité des eaux indispensables au développement des villes et des périmètres irrigués, les ingénieurs ont développé préférentiellement les approches mécaniques qui s'avèrent finalement coûteuses et relativement peu efficaces. On constate aujourd'hui que la protection des terres est l'affaire de ceux qui la gèrent : paysans et éleveurs. Pour obtenir leur participation, il paraît nécessaire de changer de stratégie, de répondre d'abord à leurs problèmes urgents (la sécurité alimentaire, l'amélioration de leur niveau de vie, etc...) La conservation du sol reste indispensable, mais elle est insuffisante pour assurer un développement réel et durable : les terres sont déjà trop pauvres et trop dégradées. La GCES tente d'y parvenir en améliorant à la fois la gestion de l'eau et des nutriments pour augmenter nettement la production de biomasse.

L'aménagement du territoire reste le domaine de l'Etat, qui est le seul à disposer des ingénieurs compétents et des moyens suffisants pour résoudre des problèmes tels que la reforestation des montagnes, la correction torrentielle, l'aménagement des rivières, la stabilisation du réseau routier et des zones de glissement de terrain. La RTM et la CES restent donc des stratégies valables aujourd'hui, mais elles doivent être associées à des approches tenant mieux compte des intérêts des paysans.

Chapitre 3

Quelques aspects socio-économiques de l'érosion

L'érosion n'est pas seulement un problème technique. Si la lutte antiérosive a connu jusqu'ici des succès mitigés, ce n'est pas seulement parce qu'on n'a pas bien résolu tous les aspects techniques du problème, mais aussi, parce qu'on n'a pas suffisamment étudié les racines socio-économiques des crises d'érosion.

Au nom du bien public, les ingénieurs de l'Etat ont cherché le moyen de faire accepter leurs solutions sans trop se préoccuper des intérêts particuliers de chacun des "bénéficiaires" des aménagements. Nous chercherons à rencontrer ces interlocuteurs gestionnaires des terres et à définir leur réaction en fonction de leurs soucis immédiats.

Ensuite, nous aborderons l'analyse de l'extension des problèmes d'érosion dans le monde et l'importance particulière des averses exceptionnelles.

Puis, nous schématiserons les connaissances sur le coût de l'érosion : d'une part, les effets immédiats *in-situ* de l'érosion et du ruissellement sur la production, les pertes en nutriments et l'évolution de la productivité à long terme des terres dégradées à l'échelle de la parcelle. D'autre part, les nuisances à l'aval (off-site) que crée le ruissellement lorsqu'il augmente les pointes de crue, réactive le creusement des rivières et la dégradation des berges, ou lorsqu'il pollue les eaux par les nutriments et les suspensions, ou lorsqu'il envase les barrages et réduit la qualité des eaux indispensables au développement des villes et de l'agriculture intensive.

Enfin, nous tenterons d'orienter le choix d'une stratégie de lutte antiérosive à partir des objectifs économiques des projets et nous préciserons les conditions de réussite de ces projets d'aménagements. Une brève étude de cas d'un aménagement antiérosif au Maroc sera présenté.

LA DIVERSITE DES CRISES EROSIVES (communication de Ch. Lilin)

Lorsqu'on passe d'une époque ou d'un pays à un autre, on constate qu'il est possible de définir de grandes catégories de crise érosive, même si chaque situation est spécifique dès que l'on approfondit l'analyse. La démarche risque d'être inappropriée lorsque cette diversité est sous-estimée.

L'ÉROSION ET LE DÉSÉQUILIBRE POPULATION-RESSOURCES

L'augmentation de la population se traduit par une pression accrue sur les ressources naturelles d'un espace, ce qui à son tour, conduit à leur surexploitation et à leur dégradation.

L'histoire de nombreux pays est jalonnée de crises érosives de ce type. Elles peuvent être classées en fonction des facteurs de dégradation ou des réponses apportées.

- **Les facteurs qui participent à la dégradation.** Dans beaucoup de cas, les effets du déséquilibre entre la population et les ressources sont aggravés par d'autres processus. Ainsi, dans de nombreux pays en développement, nous observons une différenciation sociale importante dans les sociétés rurales. Les fractions sociales déjà défavorisées sont marginalisées. Leur accès à la ressource foncière se dégrade, ce qui se traduit par leur **rejet vers les terres marginales** (souvent aussi les plus fragiles). De même, ces fractions défavorisées sont souvent caractérisées par un statut foncier médiocre. Or, l'insécurité foncière et des statuts tels que le métayage ou l'indivision sont défavorables à l'investissement, les risques étant trop importants ou les bénéfices pour l'exploitant trop faibles.

D'autres processus contribuent à créer des conditions difficiles pour l'investissement que constituent en général les mesures antiérosives : la faiblesse des ressources financières disponibles, par exemple. La marginalisation se traduit également par l'adoption de **logiques de survie qui privilégient le très court terme**. Elles peuvent se maintenir même lorsque les conditions ont évolué et sont devenues plus favorables aux fractions défavorisées de la paysannerie.

Ainsi, dans de nombreux pays, les effets mécaniques de l'augmentation de la population sont aggravés par des processus sociaux qui créent ce que l'on peut appeler **une spirale de la dégradation**. Dans ce cas, l'érosion constitue l'un des aspects du sous-développement et ne peut en être dissocié.

- **L'élaboration de la réponse.** Une crise érosive peut être assimilée à une maladie qui agresse un organisme, en l'occurrence une société rurale. Les historiens qui ont travaillé sur des crises appartenant au passé, ont montré comment les sociétés locales ont réagi pour maîtriser l'érosion. Ainsi, Blanchemanche analyse la réponse apportée aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles à la crise érosive observée dans les collines de la région méditerranéenne française. Les sociétés rurales ont répondu au défi en intensifiant la production agricole grâce à des techniques telles que la terrasse et l'irrigation. Elles se sont inspirées de ce qui se faisait dans des régions plus avancées techniquement, telles que la Toscane, par exemple. Les élites locales ont alors joué un rôle clé dans la recherche de techniques (transfert de technologies), dans leur adaptation aux conditions locales et dans leur diffusion.

Par contre, dans de nombreux pays en développement, la capacité des élites locales à prendre en charge le problème de l'érosion est déficiente. Les sociétés rurales sont souvent en crise, les structures traditionnelles ont perdu leur autorité sans que les structures modernes mises en place soient en mesure de jouer leur rôle de façon efficace. Ces sociétés ne disposent pas des structures nécessaires au niveau local pour répondre aux divers défis du sous-développement. La tentation est grande pour un acteur social

comme l'Etat de se substituer aux structures locales défaillantes et, au moyen de projets, d'apporter les éléments techniques de la réponse au problème de l'érosion.

Une telle stratégie a pu être efficace dans le contexte très particulier de l'érosion en montagne dans la France du 19^{ème} siècle. Une stratégie d'intervention de l'Etat privilégiant la dimension technique du problème peut également être appropriée dans le traitement de la crise érosive actuellement observée dans certaines régions de grandes cultures et de vignobles sur côtes en France, dans la mesure où les sociétés rurales concernées disposent de structures locales efficaces (par exemple, au niveau de la commune, du Conseil général, de la profession agricole, de l'administration de l'agriculture dans le département). Le rôle principal de l'Etat est alors de stimuler la production et la diffusion de références techniques adaptées, de façon à accélérer la mise en place des mesures permettant d'assurer la maîtrise de l'érosion.

Par contre, lorsque la crise érosive concerne des sociétés rurales elles-mêmes en crise, la maîtrise de l'érosion passe en grande partie par le renforcement de l'autorité de structures locales. L'aspect institutionnel du problème ne doit pas être négligé dans ce cas.

L'ÉROSION COMME UNE BAVURE DE LA MODERNISATION

L'érosion peut être interprétée comme résultant d'une modernisation trop hâtive de l'agriculture dans certaines régions de grandes cultures ou de vignobles de l'Europe de l'ouest. Ces dernières décennies ont été marquées par un ensemble de changements qui se sont traduits par une augmentation très importante de la productivité à l'hectare et, encore plus, de la productivité par travailleur agricole. Les impacts sur le sol de ces changements nombreux et rapides (spécialisation des systèmes de production, mécanisation et motorisation, agrandissement de la taille des parcelles, et suppression de structures jouant un rôle dans le fonctionnement hydrologique du paysage, etc) ont été importants. Dans certaines régions, ces transformations ont conduit à l'apparition d'une crise érosive.

Dans les pays tropicaux, nous observons une situation similaire là où une agriculture traditionnelle a été remplacée par une monoculture moderne mécanisée.

De même, à des époques plus anciennes, les changements de pratiques culturales ou l'introduction d'une nouvelle culture se sont parfois traduits par le développement de l'érosion : passage à l'assolement triennal obligatoire, introduction de la culture de la pomme de terre, etc.

Lorsque l'érosion peut être analysée comme conséquence de la modernisation de l'agriculture, la priorité doit être donnée aux aspects techniques du problème. Une fois les références nécessaires élaborées et testées, leur mise en oeuvre sera d'autant plus facile que les agriculteurs les plus innovants sont en règle générale les plus concernés par ce problème lié à l'introduction de nouvelles techniques.

LA LUTTE ANTIÉROSIVE N'EST PAS SEULEMENT UN PROBLÈME TECHNIQUE

Une meilleure prise en compte de la diversité des crises érosives permet de mieux adapter les stratégies aux contextes rencontrés. Suivant les cas, l'importance à donner à la production

et à la diffusion de références techniques, au traitement du problème du sous-développement dans sa globalité, ou aux aspects institutionnels sera très variable.

Une difficulté majeure provient de ce que c'est dans les pays sous-développés que le traitement simultané de ces différents aspects s'impose et constitue souvent la clé de l'efficacité des actions entreprises. Or, c'est également dans ces contextes difficiles que la production de références adaptées est souvent déficiente, que la coordination des actions de différentes administrations est difficile et que le poids des projets bénéficiant d'aides étrangères s'oppose à la continuité des actions entreprises.

QUI S'INTERESSE A LA LUTTE ANTIEROSIVE ?

En général, les gros propriétaires (> 500 ha) sont peu concernés par l'érosion car ils peuvent facilement abandonner les terres dégradées aux friches.

En France, on observe relativement peu de problèmes d'érosion pour les petites exploitations (élevage ou polyculture avec élevage) car leurs terres sont de petites dimensions, souvent bien fumées parce que leur élevage se fait hors sol, en stabulation permanente. En fait, ce sont les agriculteurs les plus entreprenants qui ont de sérieux problèmes d'érosion car ils se sont endettés pour acquérir les gros tracteurs et les outils préparant finement les lits de semence et de lourdes remorques pour transporter les récoltes. Ils ont accepté le remembrement pour regrouper et rentabiliser au mieux leur exploitation en supprimant tous les obstacles (fossés, haies, bosquets) à la mécanisation lourde. Enfin à l'aval, ce sont les gens touchés par les dégâts liés aux débits de pointe du ruissellement, aux pollutions de nappes et rivières, aux ravinements et aux coulées de boues dans les zones d'habitat, qui posent les problèmes de la lutte antiérosive. Les propriétaires des grandes exploitations devront s'intéresser aux techniques de non travail du sol, d'autant plus que la nouvelle politique agricole de la CEE préconise une réduction de la production, le gel des parcelles trop fragiles et l'élevage extensif sur prairies (Séguy et al., 1989 ; De Ploey, 1991).

Dans les pays en voie de développement, de très nombreux petits paysans pauvres sont acculés à assurer la survie de leur nombreuse famille (5 à 10 personnes au Rwanda) sur de minuscules exploitations (0,2 à 1,5 ha) : malgré la baisse des rendements, ils ne peuvent laisser au repos les terres épuisées, si bien qu'elles sont souvent peu couvertes (surtout en zone semi-aride), fragiles, en pente forte et peu protégées des eaux de ruissellement venant des parcelles voisines et des routes. Certaines familles ne se décident à investir dans l'aménagement foncier de leurs terres qu'une fois que les dégâts d'érosion sont si graves qu'il n'y a plus d'autre solution. D'autres familles dans les mêmes conditions, abandonnent tout pour tenter leur chance en ville, ou bien, envoient quelques adultes dans les pays voisins pour rapporter un supplément de ressources. L'intérêt des paysans pour l'aménagement des terres dépend fortement du mode de faire-valoir. S'ils sont propriétaires, les paysans acceptent d'investir de leur temps (souvent le seul intrant disponible) pour délimiter leurs parcelles (haie vive, muret, cordon de pierres) et améliorer le foncier (amendements organiques, chaulage, terrassement progressif ou radical, défonçage pour casser les encroûtements calcaires, épierrage, agroforesterie). Il est relativement facile d'introduire l'agroforesterie ou la culture intensive sous verger, mais en cas de métayage ou de location de terre, le paysan ne peut améliorer le foncier sous peine de se voir retirer le permis d'exploitation pour tentative d'appropriation du foncier ou de voir le prix de location augmenter en relation avec l'amélioration foncière.

En Haïti, on distingue trois types de terre. Le jardin A sur lequel est bâtie la demeure du propriétaire, est un jardin multiétagé où croissent les arbres fruitiers, le fourrage pour le petit élevage au piquet, le potager et les cochons : le tout est protégé des maraudeurs et parfaitement mis en valeur. Les jardins B sont déjà plus éloignés, moins surveillés, moins intensivement exploités et moins bien protégés contre l'érosion. Enfin, la plupart des paysans louent des terres éloignées, les jardins C, non clôturés, très peu aménagés, les arbres et les sols souvent fort dégradés. Une enquête récente a montré que tous les paysans ont demandé en priorité l'aménagement de leur jardin A, les mieux protégés... quitte à aménager plus tard les terres les plus dégradées - là où les spécialistes de CES se sont acharnés sans succès depuis un demi-siècle à tester toutes les méthodes connues de fossés et de terrassement (Naegel, 1991).

L'IMPORTANCE DES AVERSES EXCEPTIONNELLES

Quand la presse parle d'érosion, il s'agit le plus souvent de catastrophes naturelles, d'évènements exceptionnels, qui ont entraîné en quelques jours, voire en quelques heures, des dégâts exceptionnels et la perte de vies humaines. Bien souvent, l'homme n'est pas le responsable direct 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 ou encore, des pluies torrentielles tombant sur des sols gelés. Cependant, par ses aménagements imprudents, l'homme peut augmenter les dégâts. Oubliant la sagesse de ses ancêtres, il a installé ses ouvrages ou sa demeure, sur la trajectoire des avalanches, de 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 exceptionnels.

Les récentes inondations de Nîmes (sud de la France) 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 route nationale 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 emportée 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 francs (FF) de dégâts et onze morts.

La question est de savoir si l'essentiel des dégâts causés par l'érosion provient de ces catastrophes très médiatisées, mais sporadiques, lesquelles sont bien difficiles à arrêter, ou si l'essentiel de l'érosion est provoqué 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 FF/ha/an tandis que le coût supplémentaire dû aux événements exceptionnels revient à 15.000 FF/ha tous les 25 ans, plus les dépenses des collectivités locales.

TABLEAU 2

Ruissellement dans les bassins-versants de Manankazo (Madagascar).

Effet du couvert végétal et des techniques antiérosives (d'après Goujon, 1972)

Couvert végétal	K _{RAM} %	K _{R_{Max}} %	Débit max. de crue l/sec/ha		
			fréq. 1/1	1/20	1/100
Steppe brûlée : - si feux - autres années	16	50 à 70	180	320	400
	13	40 à 50	-	-	-
Steppe en défens	6,5	40 à 50	125	200	250
Cultures	2,6	> 20	45	140	200
Forêt <i>Pinus patula</i> : - 0-5 ans - >10 ans	2	15 à 38	20	95	205
	0,5	1 à 5	9	30	40

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 annuel de l'érosion à l'échelle des versants. En région sub-équatoriale (Côte d'Ivoire), il semble qu'il en soit de même (Roose, 1973). Par contre, là où les cyclones sont fréquents (Nouvelle Calédonie, les Antilles, la Réunion, etc...), les trombes d'eau sont telles (500 mm en quelques heures) que leurs effets marquent profondément le paysage (ravines régressives, larges lits des rivières et abondance des terrasses alluviales). De même, 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 al.*, 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 exceptionnelles que pour les averses ordinaires ? En hydrologie, il est généralement admis (théorie du gradex) qu'au-delà d'un certain volume de pluie, caractérisée par une forte intensité ou une longue durée, le ruissellement d'un bassin tend vers 100 %. Ce point est atteint pour des averses de retour très variables selon le type de pluie, l'état du sol et du couvert végétal, et de l'aménagement de l'ensemble du bassin. Dans le cas de ces événements exceptionnels, on se trouve donc confronté à des débits de crue très importants dans les émissaires et à des transports solides impressionnants suite à des reprises de matériaux dans le lit, sur les berges et les basses terrasses. Cependant, au niveau des versants, plus on trouvera des mesures antiérosives intelligentes (des terrasses protégées par des haies, des talus enherbés, des sols bien structurés sous un paillis ou un couvert végétal dense, etc...) et moins il faudra craindre de dégâts durant ces averses exceptionnelles. Les barrages de correction torrentielle sont d'ailleurs calculés pour résister à de telles averses (communication de Mura, 1992).

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, gêné par une barre rocheuse, elle est régulièrement inondée lors des cyclones 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 personnes (Roose, 1982).

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 alimente la capitale. On peut aussi supprimer une partie du bassin versant et écrêter les crues en construisant des barrages conçus pour stocker le ruissellement des plus fortes averses. C'est une formule élégante mais coûteuse en devises étrangères. Enfin, on peut aménager les collines, planter des forêts, renforcer les structures antiérosives (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 Manankaso, sur les hauts plateaux malgaches — tableau 2) 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 (Goujon, 1972). 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.

L'IMPACT DE L'ÉROSION DANS DIFFÉRENTES RÉGIONS

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 dans le monde, 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 Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été 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 obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont déterminé le Gouvernement américain 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 USLE (Wischmeier et Smith, 1960; 1978). En 1986, Lovejoy et Napier remarquent 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 et Hénin (1956) lancèrent une enquête qui permit d'estimer que 4 millions d'hectares de terres cultivées étaient dégradées par l'érosion hydrique ou éolienne. Le danger étant considéré comme limité, les crédits de recherche dans ce domaine furent peu importants. Aussi, la France ne dispose toujours pas de référentiel de lutte antiérosive, ce qui pose bien des problèmes dans le cas des études d'impact.

Pour l'ensemble de la Communauté Economique Européenne (CEE), De Ploey (1990) estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion. La France totaliserait 5 millions d'hectares et le coût des nuisances occasionnées par l'érosion s'élèverait à 10 milliards de FF., sans compter la valeur intrinsèque des sols perdus, difficilement chiffrables.

Des chiffres bien plus dramatiques donnèrent l'alarme dans les pays tropicaux. Combeau, en 1977, rapporte que 4/5 des terres de Madagascar sont soumises à l'érosion accélérée ; 45 % de la surface de l'Algérie est affectée par l'érosion, soit 100 ha de terre arable perdus par jour de pluie !

En Tunisie, Hamza (1992) a évalué les transports solides moyens évacués chaque année par les différents bassins versants. En tenant compte d'une profondeur moyenne des sols de 50 centimètres, ce seraient 15 000 ha de terres qui se perdent en mer par érosion hydrique chaque année.

Plus sérieux que ces affirmations dramatiques, 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 1967, 1973 et 1980). Ces pertes en terre varient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 700 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 40 t/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes (Roose et Piot, 1984 ; Boli, Bep et Roose, 1993).

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 ! Epuisés 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 (Roose, 1992).

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, 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 (Elwell et Stocking, 1984). 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 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 spécifique diminue avec l'énergie des pluies (Fournier, 1955). En zone plus humide, le couvert végétal intercepte une part importante de l'énergie des pluies et du ruissellement (Fournier, 1955 et 1960). 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 antiérosive.

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

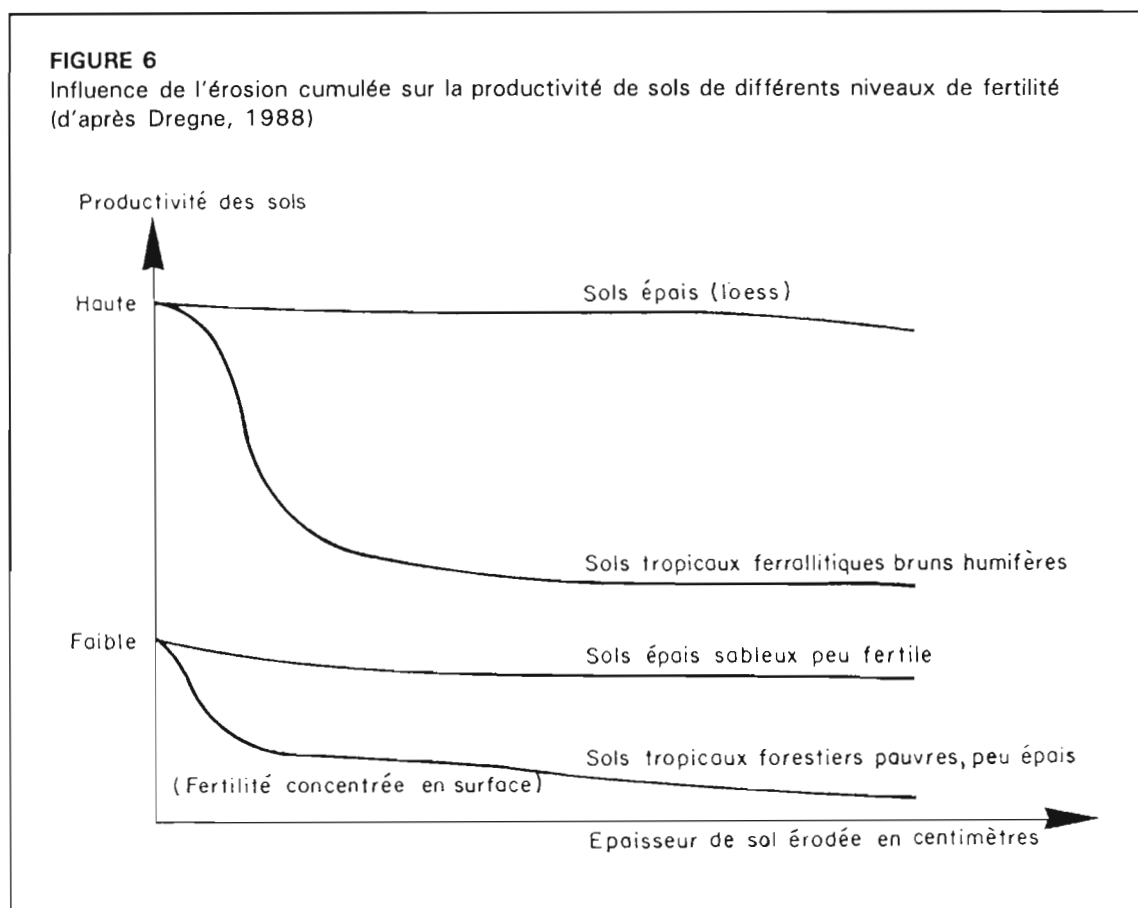
- d'une part, sur les parcelles où se sont développées les manifestations du ruissellement et de l'érosion (on-site) ;
- d'autre part, les nuisances à l'aval de ces parcelles originales (nuisance off-site).

LES CONSEQUENCES DE L'EROSION SUR LE SITE ERODE : LES PERTES DE PRODUCTIVITE

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

LES PERTES DE SURFACE PRODUCTIVES ET LES AUTRES INCONVENIENTS POUR LA MISE EN VALEUR

Prenons l'exemple de la plantation d'ananas de la Salci à Ono, en Basse-Côte d'Ivoire. Le défrichage, 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 motorisées 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 ravine importante) et les retards à la production, se font sentir d'année en année. Une fois les rigoles tracées, les eaux de ruissellement repassent généralement par les mêmes chemins : les pertes en terre s'accroissent donc avec le temps. Il est intéressant de noter que sur 1.000 ha de petites parcelles défrichées et valorisées manuellement par des petits planteurs africains, il n'y a jamais eu de problème d'érosion. La motorisation lourde réduit la capacité d'infiltration des sols, accentue le ruissellement qui se concentre 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, Evans (1981) a 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 (2.9 %) 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, le niveau socio-économique des paysans, les terres fragiles et l'intérêt des paysans vis-à-vis de la lutte antiérosive.

LES PERTES DE RENDEMENT ET DE MARGES BENEFICIAIRES

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, mécanisation du 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, 30 % de réduction de production et 50 % de baisse de revenus nets une fois les intrants remboursés. 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 qui va être marginalisé 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). Spirale d'appauvrissement pour les pauvres et recherche de solutions nouvelles pour ceux qui en ont les moyens !

LA DIVERSITE DES EFFETS DE L'EROSION SUR LA PRODUCTIVITE DES SOLS

Aux Etats-Unis, 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 CES de 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 de l'érosion (- 1 % de rendement) fut facilement compensée par l'apport de nouveaux intrants (Dregne, 1988) (figure 6). Par contre, les rendzines peu épaisses, les sols forestiers dont la fertilité est concentrée en surface et de nombreux sols tropicaux, perdent très vite leur capacité de production.

L'EROSION SELECTIVE DES PARTICULES FINES, DES NUTRIMENTS ET DES MATIERES 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 par érosion (tableau 3), on observe (Roose, 1977) :

- que les pertes en nutriments croissent parallèlement au volume ruisselé et érodé ; les teneurs en nutriments décroissent moins vite que n'augmentent les volumes de terre et d'eau déplacés,
- on retrouve, proportionnellement, 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,

TABEAU 3
Pertes sélectives par érosion en nappe sur une pente de 7 % à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal (Côte d'Ivoire) (d'après Roose, 1977)

	Erosion totale (kg/ha/an)			Indice de sélectivité 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
					1,5	1,2
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 total 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 fit 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.

- 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 aisément de deux manières (figure 7). 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, les sols forestiers, et dans une moindre mesure, les sols de savane, accumulent en surface des matières organiques et des 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 décapées sont moins sélectivement enrichies que si l'érosion est aréolaire.

LE COUT DES PERTES EN NUTRIMENTS

Un autre aspect des pertes économiques par l'érosion consiste à calculer la quantité d'engrais et leurs coûts, pour compenser les pertes en nutriments par érosion. Ceci a été calculé par Roose (1973 et 1977) en Basse-Côte d'Ivoire. Sous forêt dense humide secondarisée, les pertes chimiques par érosion sont faibles : 26 kg/ha/an de carbone + 3,5 kg d'azote + 0,5 kg de phosphore, et quelque kg/ha/an de bases. Ces pertes sont facilement compensées par les remontées biologiques (litières) et les apports de nutriments dans les eaux de pluie.

Par contre, sous culture extensive couvrant assez mal le sol, les pertes (kg/ha/an) en nutriments par érosion s'élèvent à 98 kg d'azote, 57 kg de chaux, 39 kg de magnésie et 29 kg de phosphore et de potasse. S'il fallait compenser ces pertes par des apports d'engrais, il faudrait 7 tonnes de fumier frais, 470 kg/ha de sulfate d'ammoniaque, 160 kg de superphosphate, 200 kg de dolomie et 60 kg/ha/an de chlorure de potasse. Pas étonnant dans ces conditions, que les sols de Basse Côte d'Ivoire soient épuisés après 2 années de culture traditionnelle, d'autant plus qu'il faut y ajouter les exportations par les récoltes et les pertes par drainage (800 mm par an).

Plus tard, Stocking (1986), se basant sur les données d'analyse des terres et des eaux recueillies sur parcelles par Hudson dans les années 1960, et sur la carte d'occupation des sols actuelle au Zimbabwe, a calculé que le pays perdait chaque année, 10.000.000 tonnes d'azote et 5.000.000 tonnes de phosphore du fait de l'érosion.

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 ou provoquer l'eutrophisation des rivières et des lacs ou encore se retrouver sur les riches terres 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 déséquilibrent terriblement le bilan chimique des sols cultivés (Roose, 1980 ; Roose, Lelong, Fauck et Pédro, 1984).

LES PERTES DE PRODUCTION DUES AU RUISSELLEMENT

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

FIGURE 7

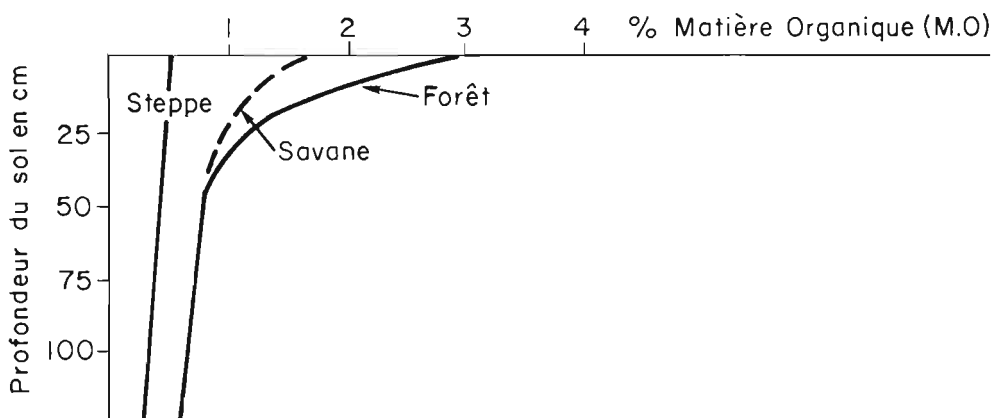
La sélectivité, danger de l'érosion en nappe

L'ÉROSION EN NAPPE EST DANGEREUSE, car :

- on la distingue mal:
même si $E = 12 \text{ t/ha/an} = 1 \text{ mm de sol}$, elle est $<$ à la respiration naturelle du sol ;
- elle réduit très fort la capacité d'infiltration des sols (croûte de battance) ;
- elle enlève sélectivement les particules fines et légères (mat. organique, A + Lf).

DEUX RAISONS DE LA SELECTIVITE DE L'ÉROSION EN NAPPE :

- 1° L'énergie du ruissellement en nappe est trop faible pour déplacer les particules grossières : à cause de la rugosité de la surface du sol, la vitesse et la compétence du ruissellement en nappe restent faibles. Seuls les matières organiques, les argiles, les limons et les nutriments qui leurs sont associés quittent la parcelle ; les sables rampent à la surface du sol et forment les sols colluviaux en bas de versant. Si l'érosion s'accélère, apparaissent des rigoles où l'érosion n'est plus sélective.
- 2° La surface du sol est généralement plus riche en matière organique, surtout sous forêt



TROIS CONSEQUENCES :

- 1° Déséquilibre accéléré du bilan des nutriments (voir tableau 4) ;
- 2° -----des matières organiques,
d'où la dégradation de la structure, de la macroporosité et de la capacité d'infiltration
- 3° Squellettisation du sol par accumulation relative des particules grossières à la surface du sol.

CONCLUSION

L'érosion en nappe accélère la dégradation physique, biologique et chimique des horizons superficiels des sols cultivés.

Or, si on calcule, ne fut-ce que grossièrement, le bilan hydrique (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, la production de biomasse et les rendements des cultures.

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 (figures 8 et 9).

Dans la réalité quotidienne en zone aride, l'effet dépressif du ruissellement sur la production est encore plus grave si, du fait du ruissellement, l'eau stockée dans le sol vient à manquer en début de cycle de culture (retard des semis), en cours de floraison (peu d'épis 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 souligner l'impact du ruissellement lors des premiers orages de début de saison des pluies qui 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 dimensionnements des ouvrages) et de réduire les débits de base des rivières, en particulier en saison sèche où l'on a besoin de l'eau pour irriguer.

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 (runoff farming) (Critchley, Reij, Seznec, 1992).

En conclusion, la lutte contre le ruissellement a des conséquences différentes selon le bilan hydrique (tableau 4). En région humide, la réduction du ruissellement entraîne une légère amélioration de l'ETR, mais surtout une augmentation du drainage, donc des risques de lixiviation — et du débit de base et d'étiage des rivières. Pour augmenter l'ETR, on peut faire appel à l'agroforesterie.

En zone semi aride (moins de 700 mm de pluie), la réduction du ruissellement augmente le stock d'eau disponible pour l'ETR et donc, la production de biomasse (et de rendement).

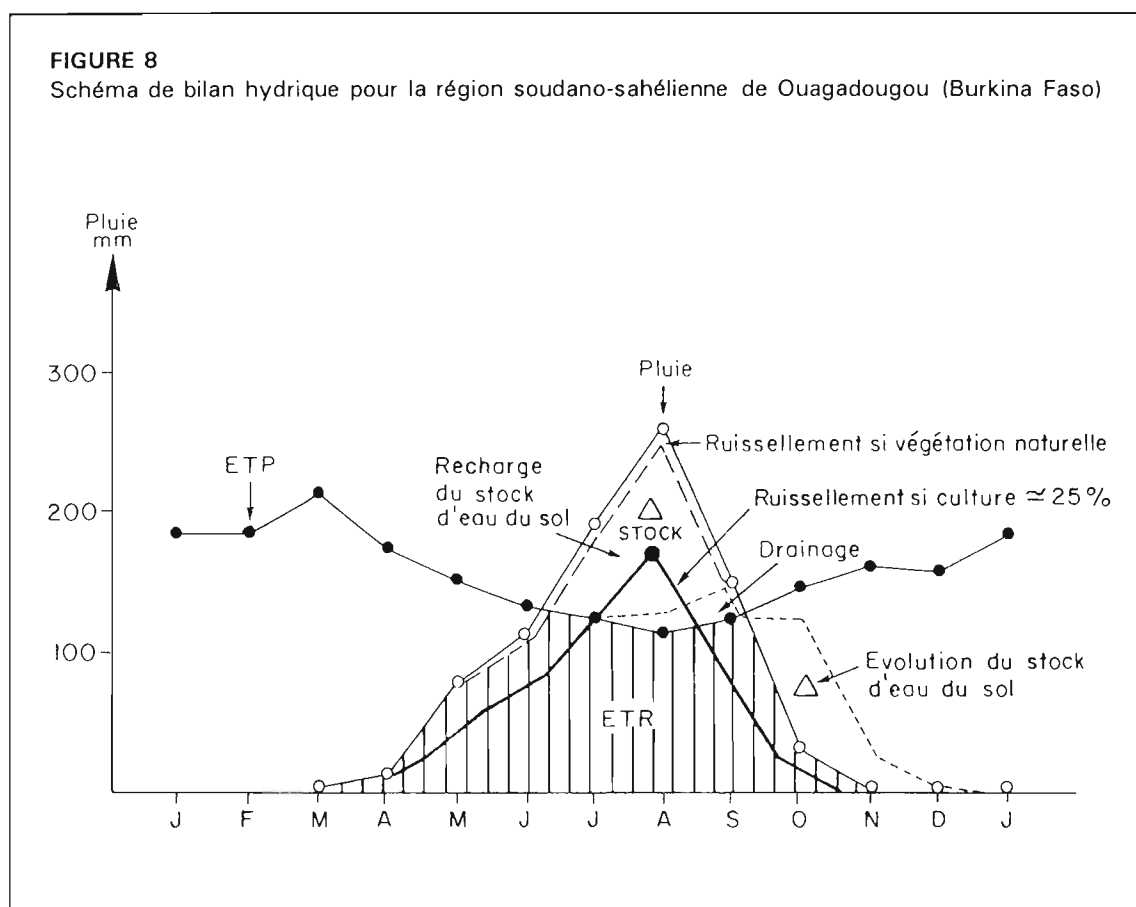


TABLEAU 4

Schéma de bilan hydrique moyen pour la région de Ouagadougou, savane soudano-sahélienne
(d'après Roose 1980)

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Ruiss. (mm)	ETR (mm)		Drainage (mm)	
				(1)	(2)	(1)	(2)
Janvier	0	187	0	0	0	0	0
Février	0	188	0	0	0	0	0
Mars	1	216	0	1	1	0	0
Avril	19	178	0	19	19	0	0
Mai	81	155	2	79	79	0	0
Juin	116	136	3	113	113	0	0
Juillet	191	129	5	129	129	57	0
Août	264	116	7	116	116	141	4
Septembre	151	126	4	126	126	21	21
Octobre	37	149	0	37	149	0	0
November	0	165	0	0	82	0	0
Décembre	0	160	0	0	0	0	0
Total	860	1 905	21	620	814	219	25
%	100	222	2,5	72	94,6	25,5	2,9

(1): brut

(2): corrigé

LA REDUCTION A LONG TERME DU POTENTIEL DE PRODUCTION DU SOL PAR L'ÉROSION

Le ruissellement et l'érosion peuvent avoir une influence néfaste **immédiate** sur les rendements des cultures en place. Ils peuvent aussi modifier progressivement les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (par érosion sélective des éléments les plus fertiles) et réduire les potentialités à long terme de certains sols, en particulier des sols peu épais (faible capacité de stockage de l'eau et des engrais) et des sols forestiers (dont la fertilité et les activités biologiques sont concentrées dans les horizons superficiels). On peut se demander s'il est possible de restaurer la productivité de ces sols en augmentant simplement la dose d'engrais (coût de la restauration des sols).

Au Nigéria, Lal (1983) a abordé le problème de l'impact de l'érosion sur la productivité d'un alfisol à la station IITA près d'Ibadan de trois façons :

- Sur 24 parcelles d'érosion (125 m²) de 1-5-10 et 15 % de pente, soumises à différents traitements de 1971 à 1976, il a mesuré différents niveaux d'érosion cumulée et calculé l'influence dépressive de l'érosion sur les caractéristiques de l'horizon superficiel, en particulier pour le carbone, l'azote, le phosphore assimilable, le pH et la porosité totale. L'analyse par régression multiple de l'effet de trois propriétés du sol sur les rendements en grain du maïs indique que les changements de caractéristiques du sol apportés par l'érosion ont un effet significatif sur les rendements en maïs.

$$\text{Rdt maïs} = 1,79 - 0,007 E + 0,70 (\text{C.O.}) + 0,07 (\text{Po}) + 0,002 (\text{Ic}) - r = 0,90$$

Le rendement en grain de maïs (t/ha) diminue avec l'érosion cumulée (E en t/ha), mais augmente avec le taux de carbone organique (Co en %), la porosité totale (Po en %) et la capacité d'infiltration (Ic en cm/heure).

Cette régression semble montrer que la réduction de productivité du sol due à l'érosion peut être compensée essentiellement par l'apport de matières organiques et, secondairement, par des techniques culturales qui améliorent la porosité (la capacité de stockage de l'eau) et la capacité d'infiltration du sol.

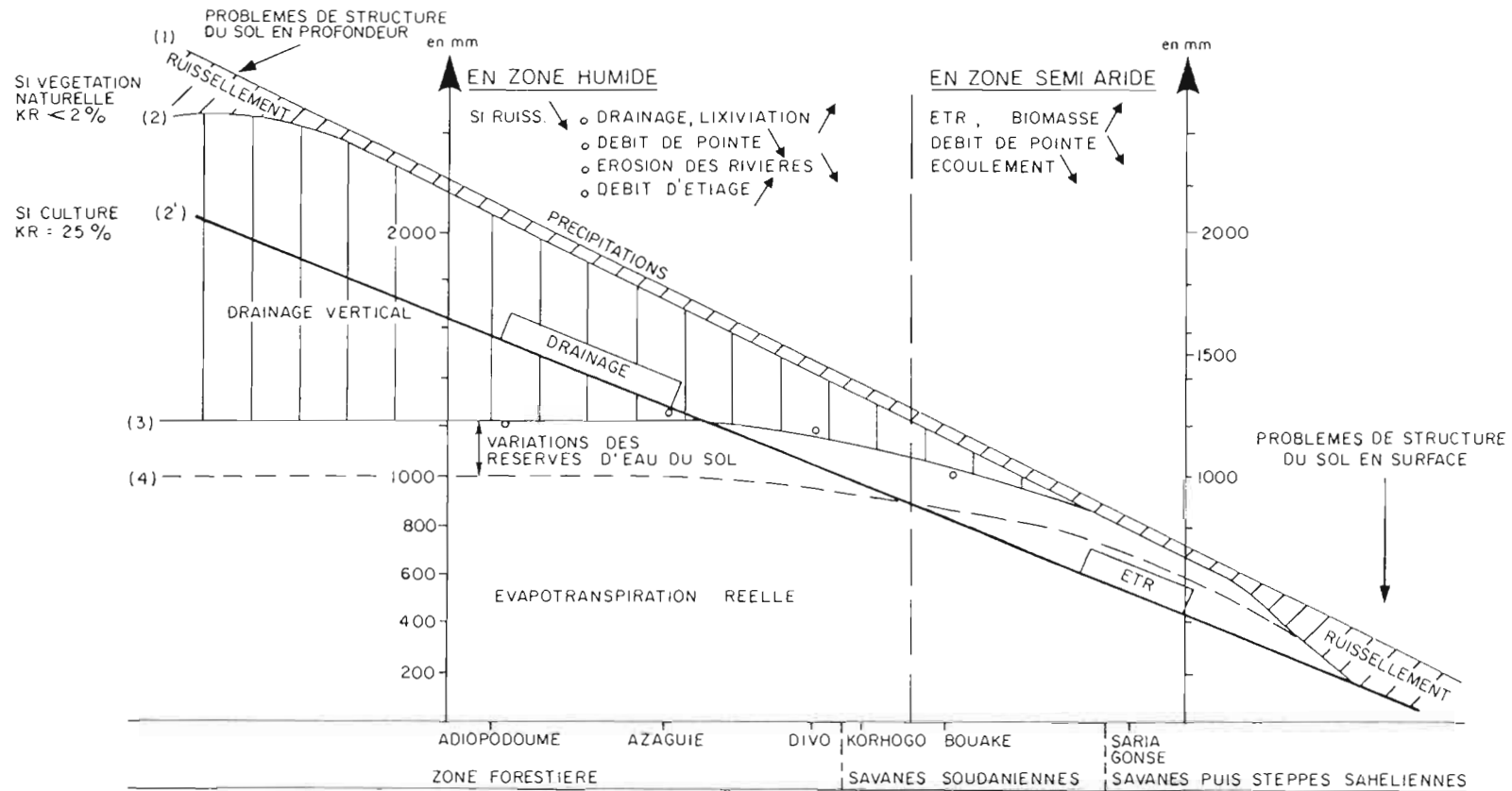
- Après avoir obtenu des niveaux d'érosion variables sur les mêmes parcelles, Lal a suivi pendant quatre saisons culturales (1977-78) les rendements d'un maïs soumis au même traitement cultural et à un niveau moyen de fertilisation (40 + 80 N + 26 P, + 30 K par ha).

Comme prévu, l'érosion la plus faible a été observée sur les parcelles de 1 % de pente. Mais, malgré le faible taux d'érosion, ce n'est pas sur la pente de 1 % qu'on a eu les meilleurs rendements, mais bien sur des parcelles de 5-10 et 15 % de pente.

En moyenne, la production de maïs en grain a diminué au rythme de 0,26 - 0,10 - 0,08 et 0,10 t/ha par millimètre de sol érodé pour les parcelles de 1 - 5 - 10 et 15 % de pente, respectivement. Le taux de réduction des rendements pour une pente de 1 % est donc 2 à 3 fois plus élevé que sur les pentes plus fortes qui sont plus sérieusement érodées. Ceci peut s'expliquer par le fait que le ruissellement augmente fort sur ces parcelles de plateau dont l'infiltration se dégrade plus vite par la battance.

FIGURE 9

Evolution du bilan hydrique sous végétation naturelle en fonction du climat (d'après Roose, Lelong et Colombani, 1983)



NOTES CONCERNANT LA FIGURE 9 :

**EFFETS DE LA LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT
EN FONCTION DU BILAN HYDRIQUE**

EN ZONE SEMI-ARIDE

Du point de vue agronomique :

- augmentation du stock d'eau disponible pour les plantes de l'évapotranspiration réelle des plantes de la biomasse et éventuellement ... des rendements

Du point de vue hydrologique :

- réduction des débits de pointe des rivières de l'écoulement total annuel des transports solides
- stabilisation des ravines et des rivières

EN ZONE HUMIDE

Du point de vue agronomique :

- augmentation modeste du stock d'eau du sol disponible pour les cultures, de l'ETR, de la biomasse et des rendements
- augmentation importante des risques de drainage et de lixiviation des nutriments
- nécessité d'intensifier l'ETR (agroforesterie et cultures associées) pour éviter la lixiviation des nutriments et l'acidification du sol

Du point de vue hydrologique :

- réduction des débits de pointe de crues
- stabilisation des ravines et des rivières
- réduction des transports solides, mais
- augmentation des débits de base des rivières des débits d'étiage ... et de l'eau utile

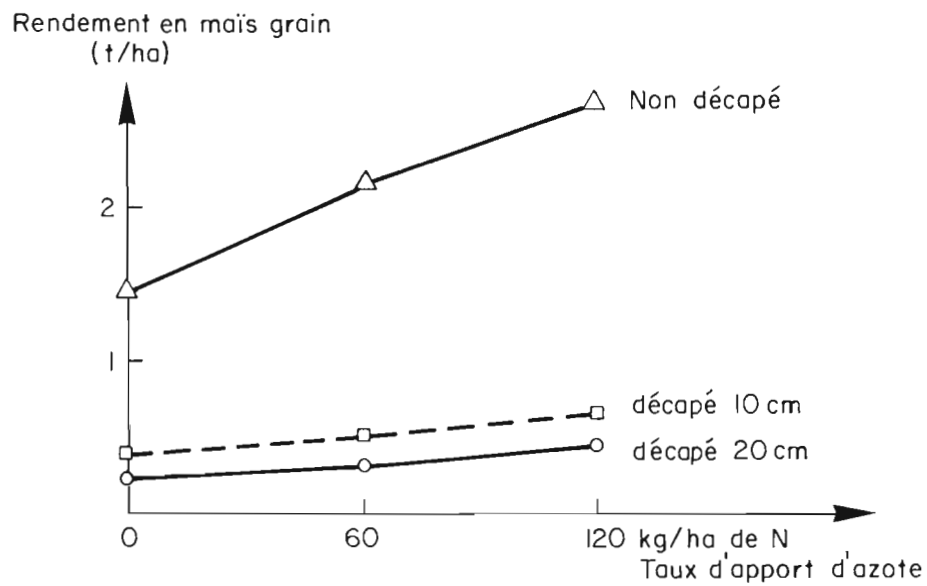
EN CONCLUSION :

L'amélioration de l'infiltration au champs sera d'autant mieux appréciée par les paysans qu'elle permet en zone semi-aride d'améliorer la production de biomasse.

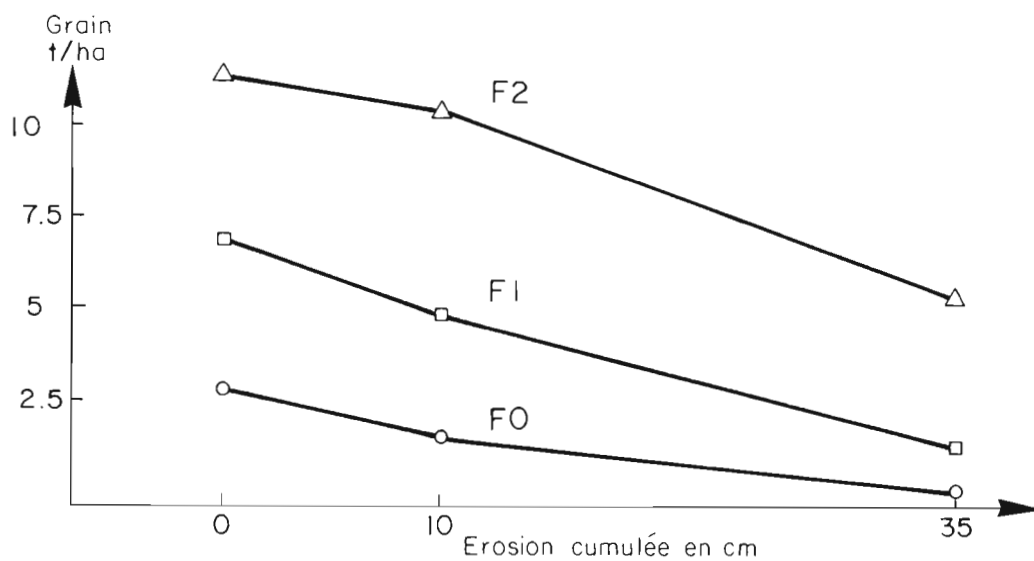
Elle doit s'accompagner d'une intensification de la culture et d'une saine gestion des nutriments, surtout en zone humide ($P > 1000$ mm).

FIGURE 10

Rendement en maïs grain pour différentes épaisseurs de décapage et trois niveaux d'apport azoté (station IITA d'Ibadan) (d'après Lal, 1983)

**FIGURE 11**

Production de maïs grain en fonction du niveau de décapage mécanique et de la fertilisation minérale en vue de la restauration de la productivité (2^{ème} récolte) (d'après Yost, El-Swaify, Dangler et Lo, 1983)



Il semble qu'au-delà du seuil de quatre millimètres (60 t/ha) d'érosion cumulée en six ans, les rendements en maïs diminuent rapidement. Le taux de tolérance serait donc de l'ordre de 10 t/ha/an d'érosion pour ce type de sol, mais il est difficile de généraliser car les taux de réduction de la productivité, en fonction de la diminution d'épaisseur du sol auraient pu être plus forts si on avait connu plus de stress hydrique pendant ces quatre campagnes agricoles.

- Pour accélérer les expériences, Lal a tenté de décaper mécaniquement la surface de parcelles de 1 % de pente situées juste à côté des parcelles d'érosion sur un sol ferrallitique sur nappe gravillonnaire vers 25 cm (paleustalf) en jachère arbustive depuis 15 ans.

Le sol a été décapé sur 0 - 10 et 20 cm et soumis à trois niveaux de fertilisation (N = 0 - 60 -120 kg/ha et P = 0 - 25 et 75 kg/ha) selon un dispositif "split plot" : tous les traitements furent répétés trois fois et le maïs a été cultivé sans travail du sol.

L'analyse de la variance montre que le décapage a un effet dépressif significatif sur la hauteur des plants, la teneur en nutriments des feuilles et les rendements en grains et biomasse. Ce qui est assez surprenant, c'est que l'effet de l'apport d'azote n'est observable que sur les parcelles qui n'ont pas été décapées, ce qui implique que l'érosion accélérée peut réduire la productivité des sols peu profonds de façon irréversible (interaction négative de l'érosion sur les effets de la fertilisation minérale).

De plus, le taux de réduction de production en grain (0,13 et 0,09 t/ha/cm) et en paille (0,16 et 0,12 t/ha/cm de sol décapé) est nettement plus élevé pour le décapage des premiers centimètres de l'horizon superficiel et le serait sans doute encore plus, si on avait décapé moins de 10 cm à la fois.

L'apport d'azote et de phosphate a eu des effets positifs sur les teneurs en ces éléments dans les feuilles des plantes cultivées. Si le rendement en grain n'a pas augmenté de façon économique, c'est que d'autres facteurs ont été limitants, en particulier, la porosité, la structure et la capacité de stockage de l'eau des horizons profonds exposés à la battance des pluies.

Si sur un même sol peu profond on compare les pertes de productivité par décapage artificiel (0,013 t/ha/mm) et par érosion naturelle (0,26 t/ha/mm), on constate que **les effets de l'érosion naturelle en nappe sont 20 fois plus graves que le simple décapage mécanique** car l'érosion en nappe évacue sélectivement les éléments les plus fertiles : les matières organiques, les argiles et limons et les nutriments les plus solubles.

Lal en conclut que les études sur "parcelles décapées" ne donnent que des indications relatives sur les effets de l'érosion sur la productivité des sols, surtout s'ils sont superficiels (figure 10).

Un autre exemple a été donné sur un oxisol (tropeptic eustrtox, kaolinitic clayey) récemment défriché sur l'île de Oahu (Hawaï) (Yost, El-Swaify, Dangler et Lo, 1983). Les études préliminaires ont montré que ce sol avait une forte concentration de la fertilité dans les dix premiers centimètres ainsi que dans un horizon compact vers 35 cm. Il fut donc décidé d'évaluer l'effet néfaste du décapage des dix premiers centimètres et d'exposer le

TABLEAU 5
Trois niveaux de fertilisation sur des sols dégradés

Fertilisation Fo	N	P	K	Mg	Zn	Mo	chaux (kg/ha)
F1	110	50	0	20	5	1	0
F2	220	450	250	100	10	2	3 500

sous-sol aux caractéristiques physiques défavorables. Les trois traitements (décapage de 0 - 10 et 35 cm) furent restaurés avec trois niveaux de fertilisation (0 %, 50 % et 100 % des besoins pour atteindre la production maximale) (figure 11).

Les résultats montrent que le sol (oxysol) a un potentiel beaucoup plus élevé (11 t/ha) que celui d'Ibadan (alfisol) et la fertilisation (surtout N et P) a une influence très nette sur presque toutes les situations. Cependant, les rendements diminuent très fort lorsqu'on décape 35 cm de sol, probablement parce que le réseau racinaire s'est mal développé dans ce cas extrême.

Sans engrais (Fo), le rendement a chuté de moitié pour un décapage de 10 cm et de 9/10^{ème} pour le décapage de tout l'horizon humifère. On retrouve l'existence d'un seuil au-delà duquel les rendements chutent brutalement, même si on ajoute des doses importantes d'engrais (110 N + 50 P) (tableau 5).

Le coût de la restauration du sol fortement décapé devient non économique (220 N + 450 P + 250 K + 3 500 CaO), car les propriétés physiques du sous-sol sont peu adaptées à la croissance des racines et le taux de fixation du phosphore par le sol est très élevé. L'impact économique de l'érosion est particulièrement important lorsque la restauration du sous-sol exige un fort investissement en phosphate et en chaux, syndrome fort fréquent dans les sols tropicaux.

Ces deux expériences, sur des sols tropicaux de niveau de productivité très différente, montrent bien à quel point l'érosion en nappe, peu apparente sur le terrain, peut avoir un impact grave à long terme sur la capacité de production des terres. Même si l'effet est modeste chaque année, cet effet dépressif s'accumule au cours du temps pour se manifester brutalement lorsque certaines propriétés du sol ont dépassé certains seuils de tolérance. Il s'agit :

- du taux de matières organiques (0,6 % selon Pieri, 1989) et d'argile (10 %),
- de la stabilité structurale et de la capacité d'infiltration,
- de la capacité de stockage de l'eau et des nutriments.

Un sol dégradé par l'érosion en nappe est un sol "fatigué" qui réagit peu aux apports d'engrais minéraux. C'est le cas des sols ferrallitiques peu profonds sur cuirasse ou nappe gravillonnaire et des sols à horizons compacts à faible profondeur.

Tous les sols cependant, ne sont pas des "ressources naturelles non renouvelables" ! On a vu au chapitre 2, à la section *La restauration des sols et la réhabilitation des terres*, qu'en

respectant un ensemble de six règles (pas seulement l'apport d'engrais minéraux), il est possible de restaurer rapidement la fertilité de bon nombre de sols suffisamment profonds. Mais la restauration des sols a un prix d'autant plus élevé qu'on a tardé à protéger le sol : il s'agit de travailler le sol en profondeur, d'y apporter des matières organiques fermentées, des engrais et amendements, d'envahir la porosité induite par une abondante biomasse ... et de protéger le sol contre le ruissellement.

Enfin, dans le cas très particulier des vieux sols ferrallitiques acides et complètement désaturés (ultisols), on peut se demander s'il ne vaudrait pas mieux accélérer leur érosion pour améliorer leur productivité. Mais à quel prix ! Il faut en effet considérer l'impact d'énormes quantités de matériaux stériles qui encombreraient les plaines plus riches et prévoir un investissement important pour restaurer la fertilité des sols rajeunis. Des expériences de formation de terrasses en gradin sur les flancs des collines du Rwanda ont montré que rien ne poussait sur ces terres remaniées jusqu'à l'horizon B sans un apport massif de fumier (30 t/ha) combiné à des amendements calcaires (3 t/ha de chaux tous les deux ans) et une fertilisation minérale complémentaire (50 N + 50 P + 50 K) (Rutonga, 1992).

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 avec un débit suffisant 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. Enfin, l'enracinement est rarement suffisant dans le sous-sol lorsqu'on a décapé l'horizon humifère.

LES CONSEQUENCES DE L'EROSION EN AVAL : LES NUISANCES

A l'amont, l'érosion touche des individus : elle est souvent perçue comme une fatalité. A l'aval, les nuisances dérangent des collectivités qui ont accès à la place publique, à la presse et organisent des débats pour dénoncer les coupables.

L'érosion a, somme toute, des influences négatives très variables sur les rendements (nulles à fortes) 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 antiérosive.

C'est le cas de la RTM qui vise le maintien des voies de communication en montagne et la protection des vallées aménagées. C'est le cas de la DRS dont l'objectif est de protéger les terres, mais surtout d'éviter l'envasement trop rapide des barrages, la destruction d'ouvrages d'art, des routes et des villages.

Même la CES, qui officiellement, vise à maintenir la capacité de production des terres, en réalité, vise aussi 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 Etats-Unis, 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 protection des terres.

Les nuisances à l'aval, c'est d'abord la **baisse de la qualité des eaux des rivières** par les matières en suspension (MES) qui accompagnent les crues formées en majorité par le ruissellement. Avec la charge en suspension, circulent 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 asphyxier les poissons). Si le ruissellement abondant à certaines périodes de l'année entraîne l'augmentation des débits de pointe dans les exutoires, il aboutit également à réduire l'alimentation des nappes et les débits d'étiage. D'une part, il provoque dans la vallée la reprise de matériaux sédimentés sur le fond et les berges : cette reprise d'érosion au niveau des petites rivières s'observe très souvent en Afrique. D'autre part, en saison sèche, le faible débit d'étiage n'arrive plus à évacuer les polluants secrétés par les industries, les villes et les cultures intensives : d'où l'eutrophisation des rivières et la mort de dizaines de tonnes de poissons chaque année en Europe. 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. Une fois le débit de pointe passé, des masses considérables de sédiments se déposent 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 la couverture végétale, de l'aménagement des versants, des ravines et des berges des rivières.

Alors que le **barrage de Kossou**, 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 à moins 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, associées à des pentes fortes et des couverts végétaux souvent fort dégradés par le surpâturage et les feux.

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les têtes de vallées (50.000 ha), les "badlands", fixer les ravines et corriger les oueds, aménager 300.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de DRS 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, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages : il ne reste que la RTM en faveur de la qualité des eaux, des périmètres irrigués et des besoins des citoyens des grandes villes. Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernant aujourd'hui 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

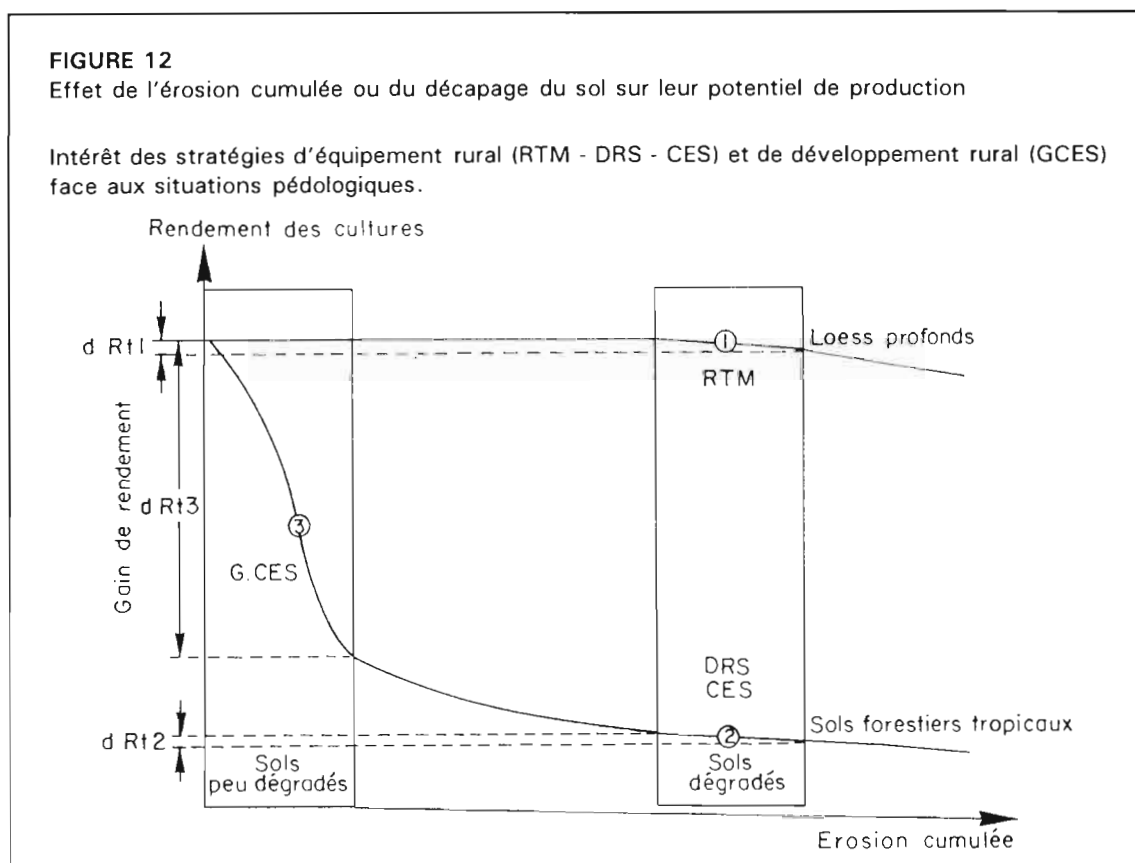
collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées. Les travaux de Heusch (1970 et 1982) et Demmak (1982) montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction de la part des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on cherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés, techniques culturales pour couvrir le sol en hiver et revégétaliser les zones surpâturées). 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).

LA RATIONALITE ECONOMIQUE DE LA GCES

Jusqu'ici, la lutte antiérosive 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 importantes (quelques milliards de dollars pour l'ensemble de la planète) ont été consacrées à des programmes de protection des terres. Cependant, leur efficacité a été faible à cause du type d'approche utilisée et de méthodes peu appropriées aux conditions socio-économiques du milieu. Les sommes disponibles étant limitées, il faut faire des choix en fonction des objectifs affichés. Il faut aujourd'hui chercher les méthodes les plus efficaces et les moins chères. Il est possible de raisonner sur ces choix des sites d'intervention en fonction des objectifs des projets. A la figure 12, apparaît une différence de réaction de deux types de sols, face à l'érosion. La courbe 3 montre la perte rapide de productivité d'un sol forestier, où la fertilité est localisée en surface. A la courbe 1, 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 conventionnelle jusqu'ici appliquée par les forestiers et les aménagistes (RTM et DRS) consistait à intervenir là où les transports solides sont les plus élevés : sur les pentes fortes, dans les ravines, les zones décapées et les sols stériles épuisés. On constate que l'impact de cette lutte antiérosive est très faible sur la productivité des terres très dégradées 1 et 2 (dRT 1 et 2 sur la figure), d'où la réticence des paysans devant les équipements imposés, par exemple les banquettes, qui n'améliorent pas les rendements, et devant les restrictions mises au pâturage libre.

Pour obtenir une forte amélioration de la productivité des terres (dRT 3), ce n'est pas sur les terres épuisées, qu'il faut intervenir, ni sur les sols profonds (courbe 1), mais sur les sols à fertilité superficielle encore en bon état : la courbe 3 est beaucoup plus raide en cas de faible érosion que lorsque l'érosion est déjà forte et les sols trop dégradés. Cette approche est préconisée par la GCES, 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, par conséquent, beaucoup moins d'érosion.



Si 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 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 (à la longue) une productivité acceptable. Il est cependant des cas (Haïti) où les sommets des collines très décapées ("terres finies") sont la source d'un fort ruissellement qui peut détruire les sols fertiles des bas-versants. Il est alors nécessaire de végétaliser les sommets, de les mettre en défens et de capter les eaux de ruissellement dans des citernes pour l'irrigation d'appoint des sols profonds de bas de pente.

L'intervention conventionnelle sur les sols décapés entraîne rarement des effets positifs sur les rendements (dRt 1 et 2). Pour intéresser les paysans, il vaut mieux choisir des terres encore valables qui vont répondre rapidement et significativement aux nouveaux systèmes de production.

Cependant, d'un point de vue social, on ne peut abandonner toutes les terres dégradées peu rentables et provoquer un mouvement migratoire accéléré dont on connaît les problèmes. Par ailleurs, il existe des circonstances où les sols dégradés par l'érosion sont les seuls qui restent disponibles et sont susceptibles d'être restaurés avec de faibles moyens financiers. C'est le cas de certains zipellés du plateau Mossi qu'on peut actuellement récupérer en un an par la méthode du zaï (300 heures de travail de piochage + 3 tonnes de fumier et son transport (Roose, Dugue, Rodriguez, 1992).

CONSEQUENCES ECONOMIQUES DE L'EROSION

1. Pertes sur les lieux érodés (on site) : elles concernent les paysans.

- **Pertes d'eau, d'engrais et pesticides ;**
- **Perte de production immédiate** au niveau

régional	:	2 à 10 %	: compensation possible par apport d'intrants
local	:	2 à 50 %	= catastrophe individuelle = perte de la marge bénéficiaire
- **Perte de surface cultivable** au niveau

mondial ...	:	7 à 10 millions d'hectares par an
régional ..	:	2 à 5 %
parcelles ..	:	jusque 20 à 100 %

Il faudrait 2 siècles pour détruire toutes les terres cultivables

- **Perte de productivité à long terme = MEMOIRE du SOL**

Diminution de l'épaisseur de l'horizon humifère
Diminution du stockage d'eau et de nutriments
Diminution de l'efficacité de la pluie et des intrants
Diminution de la rentabilité = fatigue du sol

NOTION de DUREE de VIE des SOLS

2. Nuisances à l'aval (off-site) : concernant les citoyens.

- **Dégradation de la qualité des eaux**

pollution des rivières, mort des poissons envasement des réservoirs, dragage des ports

- **Augmentation des matières en suspension (MES)**

augmentation du prix de l'eau potable

- **Inondations des zones habitées**

coulées boueuses, fossés ensablés

- **Augmentation des débits de pointe des rivières**

destruction des ouvrages d'art, ponts, etc...

3. Conséquences majeures pour la lutte antiérosive.

L'érosion sur les sols

profonds	n'a d'effet que sur les nuisances à l'aval, peu sur les rendements
superficiels	a un effet rapide sur la dégradation des rendements.

Choix d'une politique économique de LAE :

- **RTM et DRS**

sur les terres dégradées améliorent peu les rendements mais réduisent les transports solides
--
- **CES**

réduit les pertes en terre des champs, conserve les sols, mais n'améliore pas leur fertilité
--
- **GCES**

. s'intéresse d'abord aux terres productives	
. améliore les rendements	en restaurant leur fertilité
	en réduisant le ruissellement
	en augmentant la couverture végétale
. réduit indirectement ou à long terme les débits de pointe et les transports solides des rivières.	

CONCLUSIONS

- La dégradation des terres ne gêne sérieusement que quelques petits propriétaires terriens.
- Les nuisances à l'aval coûtent bien plus cher et forcent l'Etat à réagir.
- Généralement on améliore le drainage (canaux en béton) pour réduire les nuisances.
- La GCES propose de s'attaquer à la cause et d'améliorer l'infiltration en modifiant les systèmes de production.

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) 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 semences sélectionnées, 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), l'intervention ne peut intéresser les paysans des hautes vallées que moyennant des incitations ou des compensations pour les surfaces de production perdues, les heures de travail, les inconvénients créés par les ouvrages (fossés, banquettes, etc...). Il ne faut pas trop compter sur ces paysans pour l'entretien de ces structures, toujours dangereuses en cas de débordements (ravinement). (Roose, 1991).

En réalité, on est souvent amené à un compromis : arrêter rapidement les processus les plus actifs sur les terres dégradées et les ravines, intercepter le ruissellement sur les versants caillouteux décapés et par ailleurs, entamer une modification progressive des systèmes de culture sur les bonnes terres en voie de dégradation.

LES CRITERES DE SUCCES DES PROJETS DE CONSERVATION DES SOLS

Au Séminaire de Porto-Rico en 1987, l'ensemble des 136 participants, chercheurs et développeurs ayant tous une expérience de conservation des sols en région tropicale à pente forte, ont discuté longuement des raisons de succès des projets de conservation des sols (Sanders, 1988 ; Hudson, 1991). Nous présentons ici nos conclusions intégrant d'autres expériences (Critchley, Reij, Seznec, 1992).

- **Pas de recette universelle.** Si les règles de conservation de l'eau et de la fertilité des sols sont valables partout, les conditions écologiques combinées aux conditions socio-économiques sont si variables qu'il faut bien se garder de vulgariser des recettes universelles. Il convient d'une part, d'étudier l'efficacité, le coût et les limites de chaque technique, ensuite de définir pour chaque pays des régions où les conditions écologiques sont globalement homogènes, et enfin, de proposer une palette de solutions en fonction des conditions locales de pente, de régime foncier, de possibilités économiques, de formation des chefs d'exploitation, de disponibilité en main-d'oeuvre et en matériaux.
- **Tenir compte des priorités immédiates des paysans :** augmenter la production, la sécurité, les revenus et le niveau de vie, valoriser le travail. Si la conservation des sols n'est conçue qu'en fonction des problèmes posés par les dégâts causés par les sédiments ou les inondations à l'aval, le paysan des hautes vallées ne se sentira pas concerné : l'Etat devra intervenir et prendre en charge l'équipement hydraulique rural. La

conservation des eaux et des sols exige un rude effort pour structurer le paysage, gérer les eaux de ruissellement, modifier les techniques culturales et entretenir au fil des années les aménagements. Si les paysans remarquent que les terres continuent à se dégrader (par minéralisation des matières organiques et battance des pluies) et les rendements des cultures à décroître, ils vont vite renoncer à étendre, voire même à entretenir, les dispositifs antiérosifs qui exigent tant d'effort sans rien rapporter. Il est donc nécessaire de proposer des systèmes peu coûteux, efficaces pour gérer l'eau, mais aussi associés à un ensemble de techniques capables d'améliorer substantiellement les récoltes et les revenus nets des paysans, de réduire les risques ou de simplifier le travail (nouvelles cultures plus rentables, marché où vendre à des prix intéressants, graines sélectionnées, engrais, herbicides, pesticides). Les sols étant le plus souvent déjà pauvres et mal structurés, il faut prévoir la restauration rapide de sa fertilité (enfouir des matières organiques fermentées pour améliorer la structure, reconstituer son système poreux, améliorer sa capacité d'infiltration et de stockage de l'eau et des nutriments, corriger le pH et les carences du sol signalées par les plantes, nourrir la plante directement à son rythme si le sol a une capacité de stockage réduit, favoriser leur enracinement profond) en même temps, réduire au maximum les pertes d'eau et de nutriments par érosion et/ou par drainage profond.

- **S'appuyer sur les méthodes traditionnelles** : Trop souvent méprisées, il faut les étudier, évaluer leur variabilité d'un paysan à un autre, leurs limites, leurs potentialités économiques, les améliorations. On peut même en tirer des conclusions sur le milieu écologique, le bilan hydrique, les risques majeurs (en année très sèche ou en cas d'averses diluviennes). En effet, le paysan traditionnel ne peut se permettre le luxe de rater complètement une récolte : il intègre donc le fonctionnement du paysage en période exceptionnelle (Roose, 1990).
- **Des programmes à long terme avec une grande flexibilité**. Comme il s'agit de faire naître un changement profond de comportement (l'érosion n'est pas une fatalité, mais le résultat d'une gestion imprudente), il faut du temps pour convaincre, du temps pour mettre au point les techniques, du temps pour former les futurs responsables des communautés rurales. Déjà, certains financiers admettent qu'on ne peut exiger les mêmes taux de rentabilité immédiate ni la même durée des projets en vue d'améliorer l'environnement : il faudra encore faire admettre aux équipes d'évaluation qu'il est difficile de fixer une programmation de chaque opération alors qu'on ne peut savoir a priori, quelle est la combinaison de solutions partielles (le paquet technologique) qui remportera l'agrément de la population. De même, il suffit d'une campagne déficitaire en pluie pour retarder l'avancement du projet. Il faut donc prévoir des relais de financement et des rythmes différents d'évaluation pour les paysans et les techniciens locaux et d'autre part, pour les experts internationaux.
- **Des projets modestes s'étendant progressivement** (reproductibilité). Comme il est indispensable que la communauté rurale prenne en charge son environnement, il est plus sage de commencer modestement par des actions simples d'intensification de la production et de progresser en fonction de la participation paysanne à tous les stades de la mise au point de techniques, à leur réalisation, à leur évaluation, leur entretien et leur généralisation sur un versant, un terroir, une colline ou un petit bassin versant.

- **La nécessité d'une sécurité foncière** : un paysan qui loue sa terre n'est pas sûr de la garder, une fois aménagée ! Craignant une tentative d'appropriation, son propriétaire peut la lui reprendre, quitte à la louer plus cher à un concurrent. C'est un des graves problèmes posé par le développement des pratiques agroforestières.

Ce point de vue fut clairement démontré en Haïti lors d'une enquête sur un petit bassin près de Jacmel où les paysans choisissent d'améliorer d'abord le Jardin A, terre en bon état, bien couverte par un jardin multiétagé, entouré d'une haie protégeant du vol, la maison et les récoltes d'une terre en pleine propriété. Ce n'est que plus tard que les paysans ont accepté de s'occuper des terres les plus dégradées, exploitées sans aucun aménagement car louées à des propriétaires absentéistes.

En d'autres lieux (Yatenga au Burkina), on s'est aperçu que les cordons de pierres ou d'herbes et les arbres plantés en bordure des propriétés servaient bien plus, dans l'optique des paysans, à confirmer leur droit de propriété et à gérer l'eau et les nutriments qu'à protéger le sol contre l'érosion. Sans un accord avec le propriétaire, il est rare qu'un paysan soit motivé pour aménager une terre louée.

- **S'appuyer sur les structures existantes**. Créer une nouvelle structure entraîne le risque de ne pas écouter suffisamment les populations locales, méconnaître les coutumes et voir les dispositifs antiérosifs abandonnés à la fin du projet. Mieux vaut choisir soigneusement des ONG, des organisations locales et renforcer des structures ministérielles existantes (véhicules, formation des cadres, moyens de progresser par eux-mêmes) : c'est le prix à payer pour assurer la durabilité des effets d'un projet.
- **Tenir compte des systèmes de production locaux et des contraintes familiales**. Il s'agit souvent, dans un premier temps, de comprendre l'organisation économique, sociale et politique d'un groupement paysan (village, quartier, etc...) d'en saisir les contraintes (disponibilité en travail, en énergie, en fumier, en intrants, possibilité de vendre les excès de production sur le marché ou de les transformer : élevage, artisanat, commerce).

Les femmes constituant plus de 50 % des actifs sur les chantiers de CES, il faut donc prévoir leur formation dans des groupements féminins. Il faut analyser les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau, de la fertilité des terres, de la protection contre l'érosion ou l'acidification, choisir des représentants des groupes de paysans pour transmettre les messages, former les communautés, les entraîner progressivement à introduire des innovations techniques sans créer de tension entre des paysans "progressistes modèles" (souvent trop aidés pour rester représentatifs) et la masse des paysans prudents ou méfiants, suite à des expériences malheureuses.

- **Intervenir à la fois sur l'agriculture, l'élevage et la production d'arbres**. En général, les paysans s'intéressent d'abord à la production de plantes vivrières (pour assurer leur sécurité alimentaire), ensuite à l'élevage (c'est leur caisse d'épargne, leur réserve de liquidité en cas de besoin). A part les arbres fruitiers, les arbres ne sont pas cultivés : ils sont considérés en milieu traditionnel, comme un don de la nature que l'on exploite à mesure des besoins. La propriété de la terre, du bois, des arbres et des fruits des arbres n'est pas forcément liée à la même personne. Il est des pays où le service des Eaux et Forêts délivre des permis d'exploitation aux seuls bûcherons reconnus qui

exploitent les arbres en fonction du marché de l'énergie (bois de feux) ou de la construction (perches ou poutres) de la ville proche sans tenir compte du propriétaire de la terre. On comprend alors que les propriétaires soient réticents à planter des arbres s'ils ne sont pas sûrs de pouvoir les exploiter. Si "seul le bois coupé en fagots a un propriétaire", on comprend mieux la dégradation du couvert arboré en Afrique de l'Ouest, puisque n'importe qui peut couper la cime pour donner du fourrage à son troupeau !

De même, la mise en défens partielle et temporaire des terres communales en parcours pour régénérer les herbes pérennes et arbustes fourragers relève du défi puisque les villageois voisins risquent d'y envoyer leurs bêtes affamées. Mais lorsque la densité de la population est forte ainsi que la pression foncière élevée, il vient un temps où les paysans comprennent que depuis qu'on a défriché tous les arbres, le microclimat est devenu plus sec, les dégâts par ruissellement plus importants (ravines) et l'eau devient une denrée rare en saison sèche. Mais pour pouvoir réintroduire les arbres (haies vives, lignes de contours, vergers), il faut maîtriser la divagation du bétail et mettre au point un système d'élevage plus intensif (stabulation à mi-temps avec parcours réduit au chemin de l'abreuvoir, à l'entretien des pistes et des forêts, au piquet sur les jachères). L'apport de litière sous les animaux, l'appoint en fourrage (résidus de culture) et en compléments minéraux exige certes, plus de travail, mais rentabilise mieux l'élevage (moins de perte, meilleure santé, viande de meilleure qualité), valorise la biomasse dispersée et améliore la production de fumier (en qualité et en quantité... jusqu'à 5 tonnes de fumier composté/exploitant/hectare/an au Rwanda et Burundi).

Les aménagistes traditionnels ont tendance à définir clairement les zones réservées à la culture, à l'élevage ou aux forêts. Or, il faudrait profiter des interactions positives entre les arbres, les cultures et l'élevage. Le bétail profite autant des résidus de culture que du parcours, en particulier dans les zones forestières. En zone méditerranéenne, les zones forestières ont besoin des troupeaux pour réduire les risques d'incendie en broûtant le sous-étage buissonnant. Par ailleurs, les arbres profiteraient bien d'une association avec les cultures : ils se développent mieux sur les sols profonds cultivés et sarclés que sur les sols épuisés trop dégradés pour rentabiliser une culture (voir les bois de village souvent très mal exploités car personne ne sait à qui appartient le bois). Les cultures ont besoin du fumier et en particulier de l'azote, du phosphore et autres nutriments prélevés sur un large territoire et rejetés par les animaux en stabulation (ou en parc de nuit). Les arbres peuvent favoriser les cultures, apporter de la litière, recycler les nutriments perdus en profondeur, réduire la vitesse du vent et les risques d'érosion éolienne. Si donc chaque terrain a une vocation principale, il faut valoriser toutes les interactions positives entre ces trois pôles de l'agriculture.

- **Les subsides, l'aide alimentaire, les salaires.** Il est maintenant admis que les incitations, les dons de nourriture, d'outils, de salaire, etc... toute gratification en échange d'une participation à un projet d'aménagement soient limités car ils entraînent souvent le désintérêt des participants dès que l'aide disparaît. En tous cas, sur les terres privées qui bénéficient de l'aménagement, l'aide doit être réduite au minimum (des engrais, des arbres et graines sélectionnées) et supprimée dès que les partenaires sont convaincus de leur efficacité. Cependant, il est des milieux très ingrats (Sahel), des familles nombreuses dépourvues de terres, des jeunes à la recherche de travail, pour lesquels le paiement d'une forme de salaire est indispensable si l'on a besoin de

mobiliser une abondante main-d'œuvre durant la saison sèche : sans cet apport indispensable à la survie du groupe, les adultes les plus capables émigrent à l'étranger pour valoriser au mieux leur travail - même dans ce cas, la gratification doit être réduite pour permettre aux participants de développer un sentiment de propriété vis-à-vis des aménagements au point qu'ils se sentent responsables de leur entretien, de leur respect. Par contre, il est bon de faciliter la tâche des paysans en fournissant à des prix subventionnés, des équipements leur permettant d'étendre plus vite les actions d'aménagement (pics, pelles, pioches, faucilles, engrais, brouettes, charrettes pour transporter les pierres).

- **La formation des paysans et paysannes à des méthodes simples.** Si on veut que les aménagements continuent à s'étendre une fois le projet terminé, il faut apporter un soin particulier au choix de méthodes simples, accessibles à tous les villageois après formation d'un de leurs délégués, sans aucun intrant que l'on ne puisse produire au village. Il faut que chacun puisse travailler sur sa terre à son rythme, quand il le veut.

Les projets introduisant du matériel lourd offrent la meilleure garantie d'un développement rapide des structures de DRS sur le terrain et d'un échec dès que le projet se termine (pas d'entretien par les paysans). En effet, cette approche court-circuite la phase de dialogue et les tests préliminaires d'évaluation de la faisabilité, de l'efficacité et de la rentabilité des méthodes chez le paysan.

- **La conception des projets.** Pour la préparation d'un projet, il passe actuellement deux à trois missions - trop pressées sur le terrain pour discuter avec les paysans de leurs problèmes et de leurs méthodes traditionnelles. Chaque mission rédige un rapport sans trop se préoccuper d'accumuler les informations récoltées par les précédents. Certains préconisent aujourd'hui de condenser les trois phases en une, de façon à ce que la même équipe ait le temps de bien s'insérer dans le pays et de récolter des informations de première main, directement sur le terrain.
- **La recherche et le suivi-évaluation des projets.** Il reste encore bien des points techniques à préciser dans le domaine de la lutte antiérosive, mais l'étude des interférences entre le milieu humain et les connaissances techniques (en particulier le coût économique de l'érosion) s'avère nécessaire. Les chercheurs ont malheureusement rarement les moyens de mettre en place des aménagements antiérosifs particuliers. Par contre, l'analyse diachronique d'aménagements plus ou moins anciens, le suivi et l'évaluation fréquente de nouveaux programmes peuvent cependant permettre de bien comprendre les contraintes techniques et humaines.

ETUDE DE CAS AU MAROC : ANALYSE SOCIO-ÉCONOMIQUE DE LA LAE DANS LE BASSIN DU LOUKKOS (d'après Omar Alaoui, 1992)

Une étude socio-économique des problèmes liés à la lutte antiérosive a été réalisée récemment dans le bassin du Loukkos par un bureau d'étude marocain (Agroconcept).

Voici, résumées, les principales conclusions relevées par un économiste de l'équipe :

LES RELATIONS THEORIQUES ENTRE LES ATTITUDES DES PAYSANS ET LES VARIABLES ECONOMIQUES

Aucune relation simple ne peut être dérivée théoriquement entre les attitudes des paysans et des variables économiques comme l'augmentation des prix, les subventions aux intrants, l'effet "risque" ou le mode de propriété. Seules, les enquêtes de terrain permettent de préciser l'effet de ces variables localement.

UNE ENQUETE DE TERRAIN SUR LES ATTITUDES DES EXPLOITANTS VIS-A-VIS DE LA DRS FRUITIERE

Importance du facteur local : les attitudes des chefs d'exploitation dans un même douar et dans un même finage sont assez homogènes. Sur 117 exploitants situés dans 22 douars enquêtés, 41 % des exploitants sont pour les banquettes fruitières, 48 % sont contre et 11 % sont neutres, mais à l'intérieur d'un même douar, la tendance est nette.

Pour expliquer cette attitude, les facteurs techniques (inadaptation des techniques, des espèces fruitières, des terrains) interviennent moins souvent que les facteurs liés à l'utilisation de l'espace (droit d'usage, propriétés, parcours, etc...).

L'Etat crée des structures physiques de lutte antiérosive. Par ailleurs, les paysans anticipent les actions futures de l'Etat : réduction des jachères, mise en culture de pâturages pour affirmer les droits de propriété, exploitation plus intensive des terres ou demande d'aménagements pour profiter des promesses de salaires.

LE COUT DE L'EROSION

Pertes potentielles en équivalent fertilisant :

680 DH/ha/an en 1978 au bassin du Tleta, soit 510 FF ou 100 US dollars (en mai 1992)

Les processus d'érosion opèrent par sélectivité décroissante des éléments les plus riches des sols. D'où on peut admettre avec les pédologues que :

$$R_t = R_o e^{-aP_t}$$

R_t = le rendement de l'année en t/ha,

R_o = le rendement initial,

où a = paramètre initial,

P_t = pertes en terre accumulées à l'année en t/ha.

Les coûts de l'érosion par perte de rendement varient **entre 0 et 257 DH** aux prix financiers de 1990 pour un taux d'actualisation de 0,08 et du coefficient "a" variant de 0,04 à 0,15 (tableau 6).

TABLEAU 6

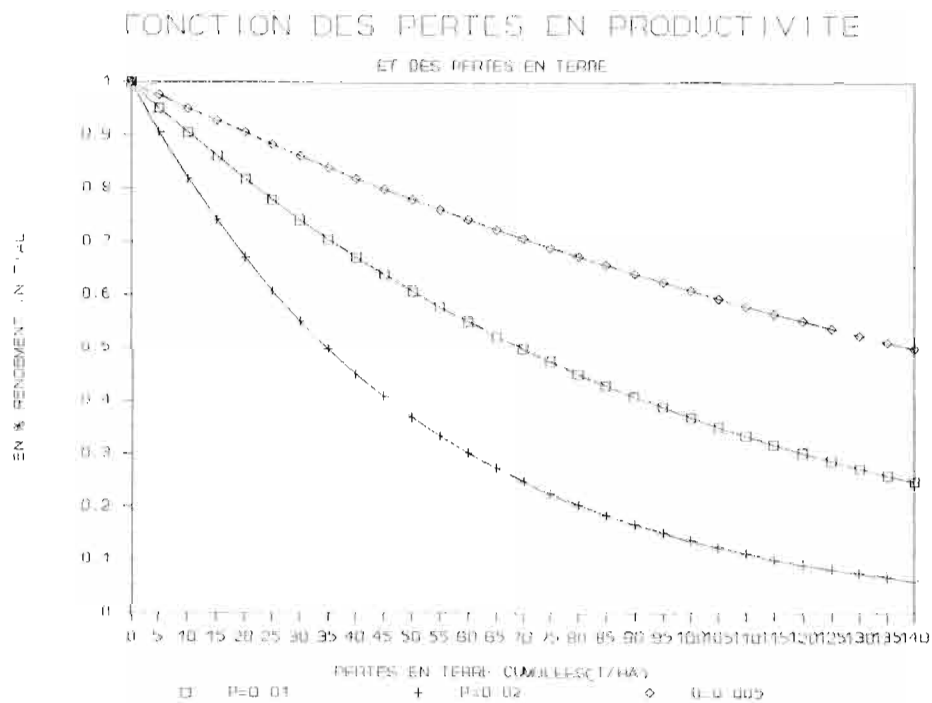
Coût de l'érosion agricole en DH/ha/an pour une rotation "céréale-jachère pâturée" sur des pentes moyennes

	Erosion t/ha/an		Coût DH/ha/an	
	Min	Max	Min	Max
Beni Boufrah (Rif oriental)	0,4	2,7	0	37
MDA (Pré Rif)	0,3	44	0	257
Mokrisset (Rif occidental)	2,7	24	33	100

Pour : taux actualisation = 0,08 ; coefficient a = 0,04 à 0,15

FIGURE 13

Perte de production en fonction de l'érosion cumulée
(d'après Alaoui Omar, Agroconcept, Rabat, 1992)



Ces résultats confirment **les perceptions paysannes sur les faibles coûts moyens de l'érosion** recueillie lors des enquêtes : les coûts de l'érosion sont faibles par rapport au coût des autres facteurs de production. D'ailleurs, **la valeur des terres varie peu** en fonction des facteurs liés à l'érosion (pente, aménagement DRS), mais beaucoup en relation avec les facteurs liés aux coûts de production (éloignement, statut, possibilité de mécanisation) et aux rendements (type de sol et de plantation) (figure 13).

Par ailleurs, les paysans ne considèrent pas l'érosion comme un phénomène certain et continu, mais comme un processus aléatoire lié à des circonstances climatiques exceptionnelles combinées à l'état de certaines parcelles à ce moment : ceci réduit encore le coût de l'érosion.

LES COÛTS DES NUISANCES DE L'ÉROSION EN AVAL

Les coûts et les avantages liés à un site hydraulique se présentent sous la forme des courbes suivantes :

- la courbe des avantages croît avec le temps avec l'extension des utilisations qui valorisent les eaux,
- la courbe des coûts décroît avec le passage des investissements de construction à ceux d'entretien.

En théorie, un site caractérisé par une courbe très redressée doit être considérée comme une ressource non renouvelable.

Au Loukkos, deux simulations ont été faites de la gestion de la retenue :

- la première au rythme d'envasement annuel enregistré pour la période 1979-1990, soit 35 millions de m³/an,
- la deuxième, avec une augmentation de 50 % de ce rythme.

Le coût de l'envasement est alors calculé comme la différence des productions obtenues dans ces deux situations valorisées aux prix économiques.

Tant que la demande agricole ne dépasse pas un seuil (50 % de la retenue), la réduction de stockage par envasement se traduit par une fréquence accrue des déversements et une disponibilité plus grande des eaux qui dépassent la cote où le turbinage destiné à la production électrique est recommandé : **c'est l'effet positif de l'envasement sur la production électrique** (figure 14).

Avec la croissance de la demande agricole à l'horizon 2020, l'effet majeur de l'envasement devient **la réduction de la fourniture agricole moyenne**.

Ces courbes des coûts ont été obtenues en valorisant la production énergétique et l'eau d'irrigation à leur coût d'opportunité (0,7 DH/kwh) : coût économique de la production énergétique de substitution et valeurs de la production agricole perdue (0,4 DH/m³).

FIGURE 14
Le coût aval de l'augmentation du rythme de l'envasement (d'après Alaoui Omar, Agroconcept, Rabat, 1992)

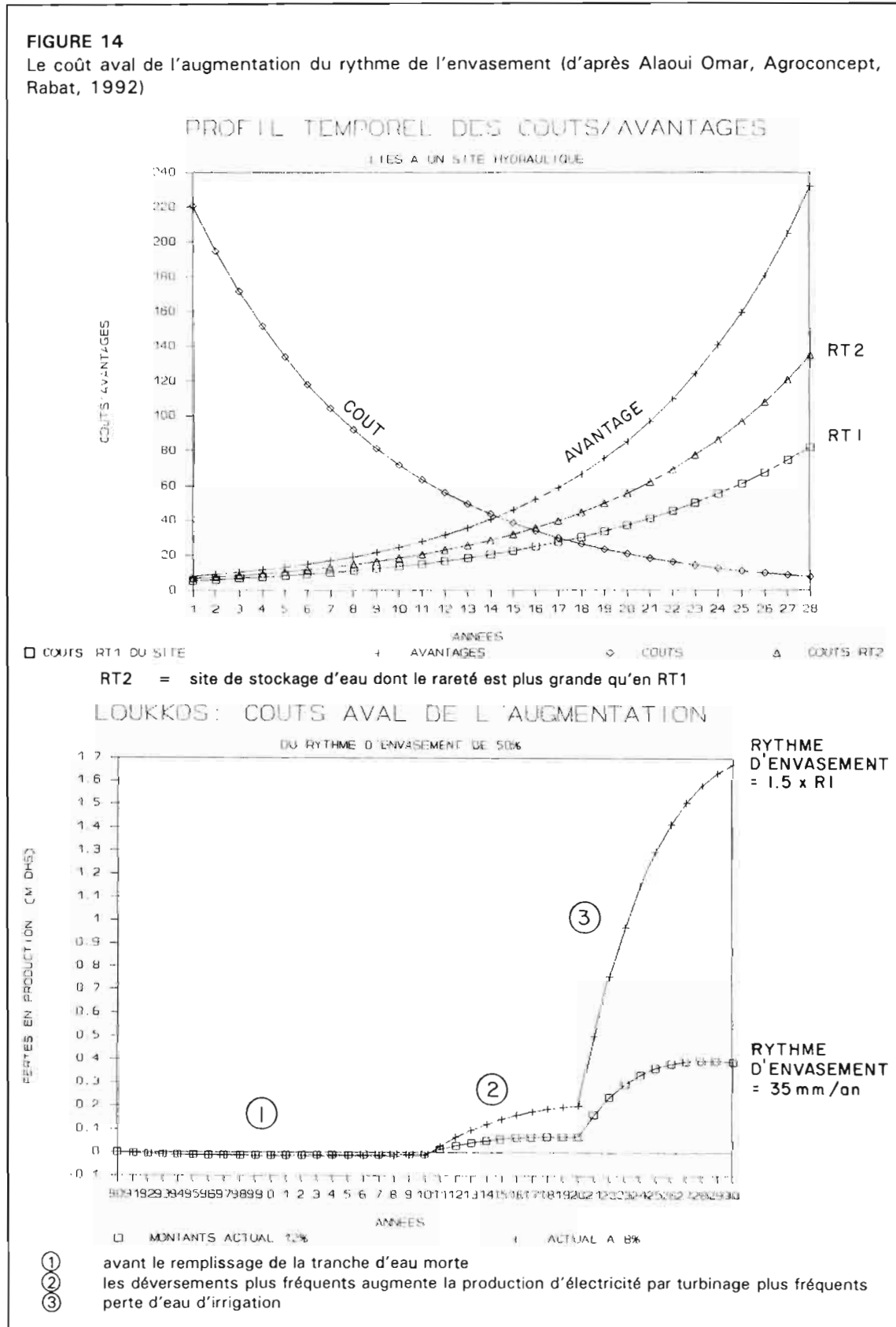


TABLEAU 7
Coût de l'envasement

Valeur de m ³ d'eau en irrigation (DH/m ³)	0,4	0,8	1,0
Taux d'actualisation	0,12 à 0,08	0,12 à 0,08	0,12 à 0,08
Coût de m ³ de sédiment (DH)	0,03 à 0,11	0,05 à 0,19	0,08 à 0,28

Si on ramène le coût de l'envasement au m³ de sédiments selon différentes hypothèses relatives au taux d'actualisation et au coût d'opportunité de l'eau, on obtient des indicateurs sur les coûts "aval" des pertes en terre utilisables dans la justification des investissements de conservation des sols. Tout investissement en lutte antiérosive peut être analysé en valorisant la totalité des mètres cubes stabilisés sur la période considérée aux coûts majeurs (tableau 7).

Compte tenu du site, cet indicateur est plus sensible au taux d'actualisation qu'aux autres paramètres.

Ceci indique que dans ce site, le choix des techniques mécaniques à effet immédiat (génie civil) n'est pas justifié par des raisons de lutte contre l'envasement, si elles sont plus coûteuses, ou moins fiables à moyen terme que les techniques de conservation biologiques à effet décalé dans le temps (ex. reforestation).

L'ANALYSE DES POLITIQUES AGRICOLES

La perte de compétitivité des productions des zones amont des bassins versants en face des produits des zones de plaine a souvent été identifiée par les historiens comme l'une des causes majeures des déplacements des populations et de la pression sur les ressources.

Si l'on souhaite réduire ces migrations, la spécialisation des économies montagnardes autour de leurs avantages comparatifs devient l'axe majeur de leur développement (exemple : tourisme, labels de qualité des produits montagnards tels que fromages, fruits, miel, etc...). (Seznec, 1992).

Une étude récente sur les soutiens octroyés à la production au Maroc en terme d'équivalent/subvention à la production (ESP), montre que les productions traditionnelles de l'agriculture des zones de piedmont et de montagne (orge, blé dur, oliviers et ovins) ont été beaucoup moins soutenues (ESP = 0 à 0,1) par la politique des prix que les productions modernes en irrigué (sucre, blé tendre, colza, betterave, élevage bovin de race pure : ESP = 0,3 à 1.5).

CONCLUSION : LES THEMES DE RECHERCHE A DEVELOPPER

- Améliorer les connaissances sur les systèmes d'utilisation de l'espace en montagne.
- Calcul économique de l'érosion en fonction des pertes de rendement en relation avec l'érosion cumulée.
- Effet des politiques agricoles sur l'aménagement intégré des bassins versants.

CONCLUSION : NECESSITE D'UNE ANALYSE SOCIOLOGIQUE ET ECONOMIQUE DES CRISES D'EROSION AINSI QUE DE L'ATTENTE DES PAYSANS

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

Cependant, localement, les pertes de rendement et de potentiel de production des terres réduisent à néant les profits des petits paysans ou entraînent une augmentation des risques de famine. Les famines réapparaissent un peu partout en Afrique semi-aride avec la forte pression démographique, la diminution des précipitations et les situations politiques instables. D'où, la migration des adultes de certaines régions (exemple, au sud 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 de l'érosion sur la productivité des sols est très variable, suivant qu'il s'agit d'un sol profond homogène ou d'un sol où la fertilité est limitée aux horizons superficiels ; des recherches sont en cours pour préciser sur quels sols les investissements en lutte antiérosive sont les plus rentables.

Les premiers résultats montrent clairement qu'il est plus rentable pour les paysans d'investir les crédits limités dont on dispose, pour aménager correctement les terres qui n'ont pas encore trop souffert. Cependant, jusqu'ici on a développé surtout la RTM et la DRS 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'irrigation des grands périmètres et 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 et 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 (stabilité du paysage et/ou qualité des eaux).

Des études complémentaires sont encore nécessaires pour étudier 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.

DEUXIEME PARTIE

La lutte antiérosive en fonction des différents processus d'érosion

ETAT DE LA RECHERCHE, DIAGNOSTIC ET APPLICATION A LA GCES

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 (tableau 8).

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. 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. 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 8

Les formes de dégradation et d'érosion, leurs causes, les facteurs de résistance du milieu ainsi que leurs conséquences sont très variées

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs 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>Forme : naissance de pellicules de battance</p>	<p>Nombreuses :</p> <ul style="list-style-type: none"> - minéralisation des matières organiques - compaction - etc... 	<p>1° la résistance de la structure est fonction des matières organiques, du fer, de l'alumine, des argiles flocculées, des cations adsorbés et des sols présents,</p> <p>2° fonction du drainage ou de la nappe chargée,</p> <p>3° la compaction est fonction du poids des outils utilisés, de la pression des pneus des tracteurs et de la fréquence des passages</p>	<p>La dégradation entraîne peu de transports, mais une réorganisation et un tassement</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>Forme : 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>Sélectivité</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 au carré $\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}MGH$</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>Sélectivité</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> <ol 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>Sélectivité</p> <p>Erosion : 0</p> <p>Dépôt : 0</p>

Chapitre 4

L'érosion mécanique sèche

DEFINITION, FORMES, PROCESSUS

Ce type d'érosion est un processus (arrachement + transport + dépôt) sans intervention de l'eau, peu connu, très peu quantifié, qui par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, décape les 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.

Chaque labour entraîne une tranche de terre (environ 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 (environ 1 t/ha). Au bout du compte, on arrive (Equateur — De Noni et Viennot, 1991) à devoir monter une murette de 1,30 mètre 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 par an (Côte d'Ivoire, au Rwanda et au Burundi — Roose et 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 près de Ouzera. Trente ans plus tard, les arbres sont juchés sur un piédestal : 30 cm de terre ont été décapés entre les arbres ! Même si on cumulait pendant 30 ans l'érosion mesurée à la parcelle nue (15 t/ha/an = 1 mm), l'érosion ne dépasserait pas 3 cm, tandis que la reptation de la couverture pédologique par le travail du sol atteindrait 27 cm, soit 135 t/ha/an (Roose, 1991) pour deux labours croisés (à l'automne et au printemps) pour maintenir le sol nu et motteux.

LES FACTEURS

L'intensité du déplacement de terre dépend :

- **du type d'outil** : la charrue à soc déplace plus de terre que le chisel (Revel, 1989), et plus que les charrues à disques, que la houe et que la herse.
- **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 méditerranéenne semi humide, il y a souvent deux labours grossiers et 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.

- **de l'orientation du travail** : le travail du sol peut être effectué en courbes 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 du bas vers le haut de la parcelle : 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 rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas 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 *et al.*, 1989).
- **de la pente**. Plus la pente est forte et plus 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 une érosion en nappe qui n'est pas compensée et surtout une érosion mécanique sèche importante.

Les ruptures de pente sont aussi altérées, la surface du sol y est plus claire et les horizons humifères moins épais : il doit donc y avoir accélération du décapage 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 terre de 15 à 50 t/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 a souvent confondu les deux processus : érosion en nappe et érosion mécanique sèche et 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 (Wassmer, 1981 ; Nyamulinda, 1989).

METHODES DE LUTTE ANTIEROSIVE

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

- **Réduire le nombre de passages des outils et l'importance du travail** du sol. On tend vers le travail réduit au minimum (minimum tillage) lorsque les résidus de culture sont abandonnés à la surface du sol et que 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 (S.O. France : Roose et Cavalié, 1986).
- 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 ou d'un cultivateur 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 ligne alors que le reste du sol est couvert par un paillis de résidus : ce mode de préparation du sol divise par dix les risques d'érosion mécanique sèche par les outils.

- **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 la saison.

- Il s'agit de **former des talus** de manière à créer à chaque niveau de versant des horizons d'accumulation de l'eau, de la fertilité 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).



Chapitre 5

L'érosion en nappe ou le stade initial de l'érosion 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 [planche photographique 1].

LES FORMES ET LES SYMPTOMES DE L'EROSION EN NAPPE

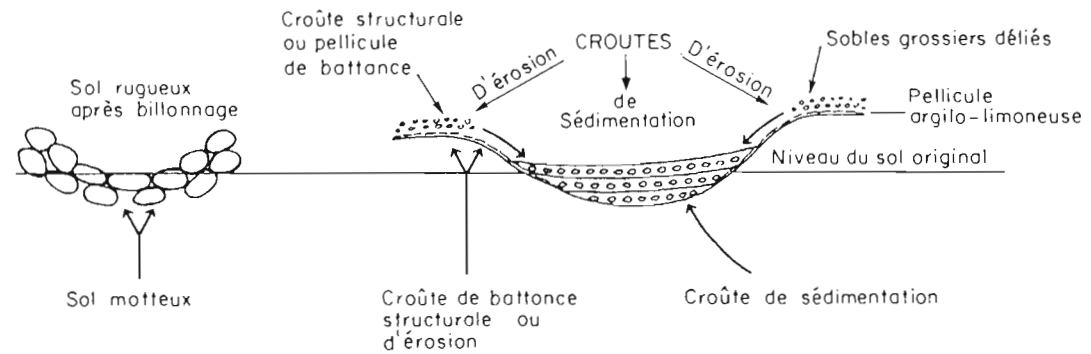
L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. De ce fait elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion importante de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2 mm. Celle-ci est peu significative par rapport au foisonnement des terres, à la rugosité du sol après les travaux culturaux (dH = 2 à 10 cm) ou par rapport à la respiration des sols à argile gonflante, du simple fait de leur réhumectation (dH 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** en quelques dizaines d'années (dH 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. 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 (figure 15) :

- **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 de la dernière averse),
- et des **colonnettes** sous les feuilles larges qui protègent le sol contre la battance.

FIGURE 15

Schéma des croûtes d'érosion, des croûtes structurales et des croûtes sédimentaires (inspirés des travaux de Valentin, 1981)

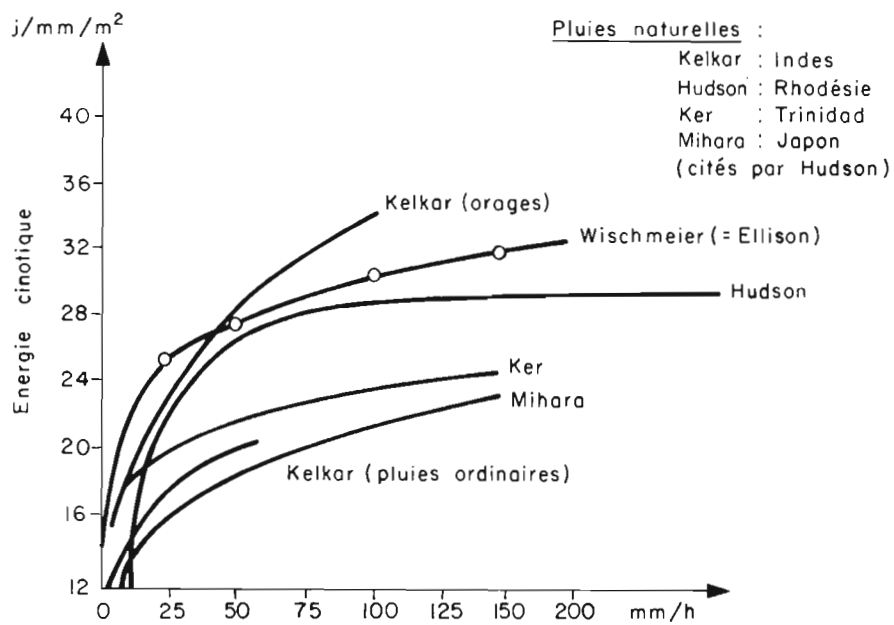


Infiltration finale > 100mm/h	5 à 15 mm/h	1 - 5 mm/heure
Épaisseur —	1 à 2 mm	5 - 30 mm
Succession quelconque	1 Sables déliés sur 2 pellicule A. limoneuse	1 Pellicule A+L+MO sur 2 sables grossiers déliés

A = argileux L = limoneux MO = matières organiques

FIGURE 16

Energie cinétique des pluies en fonction de leur intensité et des régions d'observation (d'après Hudson, 1972)



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 entailler **les microdemoiselles coiffées** et laisser en place des **microfalaises** (dH = 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 naissante : (= érosion mécanique sèche + érosion en nappe + griffes et rigoles) (Roose, 1967, 1977).

Les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- **Le nivellement de la surface du sol** par dégradation des mottes et remplissage des creux. Il s'ensuit des croûtes diverses, lisses et blanchies (exemple : zipellé en Moré veut dire : zone blanchie).
- **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.
- **Le décapage de l'horizon humifère** laissant des plages de couleur claire : l'horizon minéral sous-jacent apparaît à l'air libre.

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 la vitesse finale, déterminée par l'équilibre entre l'attraction universelle et la résistance à l'air de la surface portante de la goutte (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 3-5 mm de diamètre. 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 (Valentin, 1983). 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 multipliée par le nombre de millimètres tombés à cette intensité : ces relations (figure 16) varient considérablement selon les régions. En l'absence de données régionales sur l'énergie des pluies, on peut utiliser les données de Wischmeier et Smith, 1978.

TABLEAU 9

Influence de la saison, 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 (d'après Roose, 1973)

Dates	Pluie			Ruissellement (%)		Erosion (kg/ha)	
	h (mm)	h 10 jours (mm)	Intensité Max 30'	Sol nu	<i>Panicum</i>	Sol nu	<i>Panicum</i>
13.2.72	28	58	33	47	0	548	0
18.3.72	33	1	59	52	0,1	1 104	0
27.3.72	32	45	23	26	0	327	0
21.5.72	34	20	28	26	0	1 518	0
9.6.72	33	131	35	48	32	3 833	21
11.6.72	34	164	26	44	11	2 191	26
13.6.72	38	230	37	63	22	3 264	31
2.7.72	32	212	43	73	0,1	6 025	0,2
31.7.72	30	0	15	9	0	412	0
19.10.72	31	88	14	39	0,1	1 501	0,1
23.11.72	28	18	43	71	0	1 827	0

Cette énergie de battance est dissipée par quatre actions :

- **tassement du sol** sous l'impact des pluies après humectation rapide de la surface du sol,
- **écrasement et force tangentielle d'arrachement** (shearing stress) : séparation des particules agrégées,
- **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,
- **bruit du choc des gouttes** sur les matériaux résistants.

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 :

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

Le matériau sol peut être plus ou moins résistant du fait de la présence de cailloux ou bien en fonction du pourcentage de limon et sable fin (10 à 100 microns), de matières organiques et d'argile, de la présence de gypse ou de calcaire, d'hydroxydes 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 pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions mais, sur les pentes, 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 IRHO 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, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde. Au-delà de 25 cm/seconde, le ruissellement, peut non seulement transporter des sédiments fins, mais 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 Hulström (figure 19).

Sédimentation : c'est au cours 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 (figure 15).

L'érosion en nappe observée sur parcelle d'érosion dépend à la fois (tableau 9) :

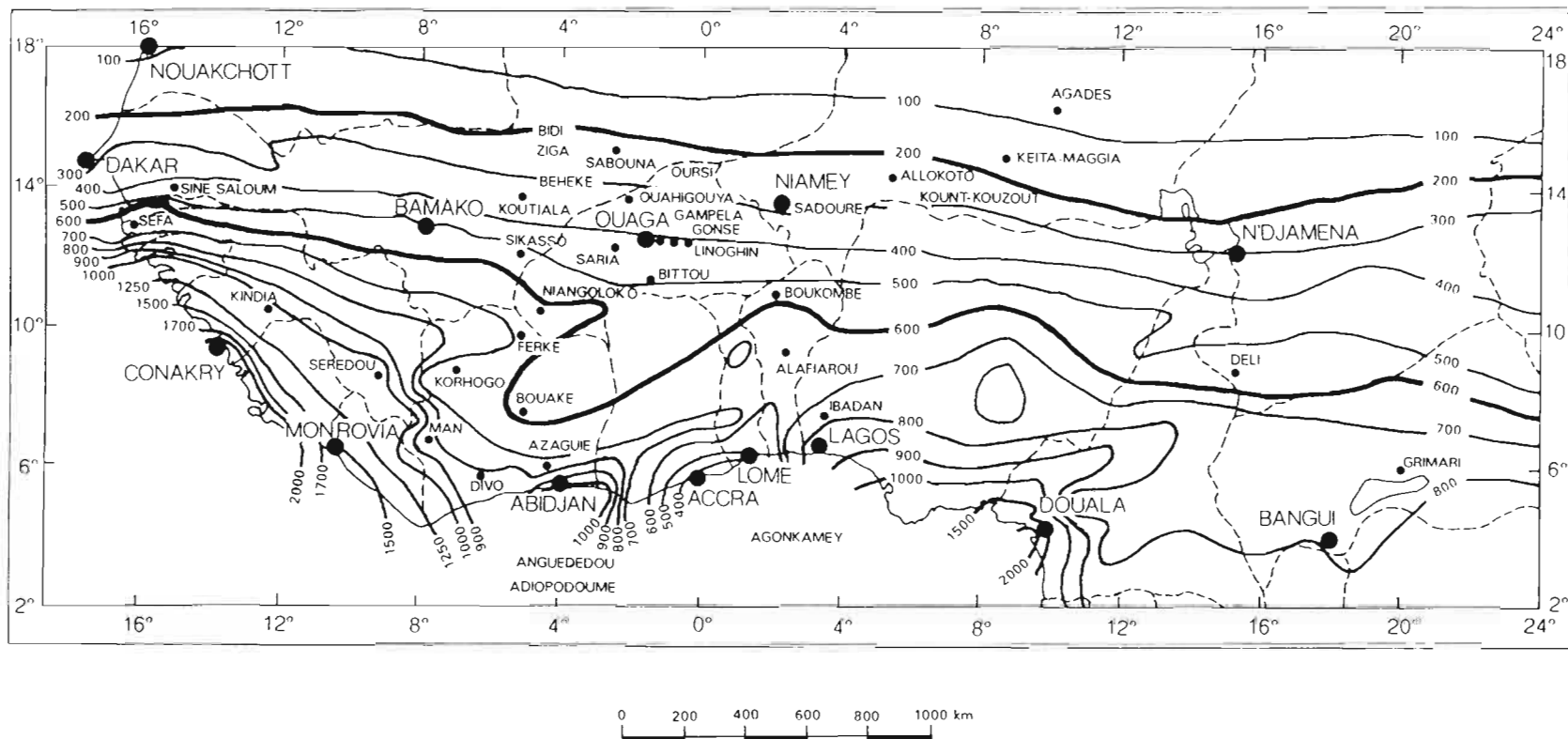
- **de l'intensité maximale** des pluies qui déclenchent le ruissellement (I max en 15 mn sur pentes fortes ou I max en 30 minutes sur les pentes moyennes),
- **de l'énergie** des pluies (E C) qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- **de la durée** des pluies et/ou de l'humidité avant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

Hudson (1965 et 1983) au Zimbabwe, puis Elwell et Stocking (1975) 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 ($I > 25 \text{ mm/h}$) ($E = K E \text{ si } I > 25 \text{ mm/h}$). Ces auteurs ont observé 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 averses suivantes.

S'il existe effectivement une **intensité limite de pluie** en-dessous de laquelle on n'observe pas de ruissellement, cette intensité 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 de Lafforgue, 1978 ; Boiffin, 1984 ; Raheliasoa, 1986 ; Casenave et Valentin, 1989). Lal (1976) pense que l'intensité maximale instantanée 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 al.*, en Equateur sur sol volcanique, 1985) mais pas forcément partout. Sur les sols ferrallitiques sableux de Basse Côte d'Ivoire, Roose (1973) a montré que plus la durée de l'intensité maximale de la pluie est importante, et plus le coefficient de régression est élevé. De son côté, Lal (1976) 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.

FIGURE 17

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)



Wischmeier (1959) a combiné dans **un seul indice d'érosivité (EI_{30})** l'énergie de chaque averse multiplié par l'intensité maximale en 30 minutes (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, et 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 Delwaulle (1973), Galabert et Millogo (1973) ont trouvé des relations linéaires entre l'énergie cinétique et la hauteur des pluies, donc :

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

Lal au Nigeria, propose : $R' = \text{hauteur de pluie} \times I \text{ max } 7'$.

En dépouillant 20 stations d'Afrique de l'Ouest, situées entre Séfa au Sénégal et Deli au Tchad, et entre Abidjan en Basse Côte d'Ivoire et Allokoto au Niger, Roose (1977) 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 (sur plus de dix ans).

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

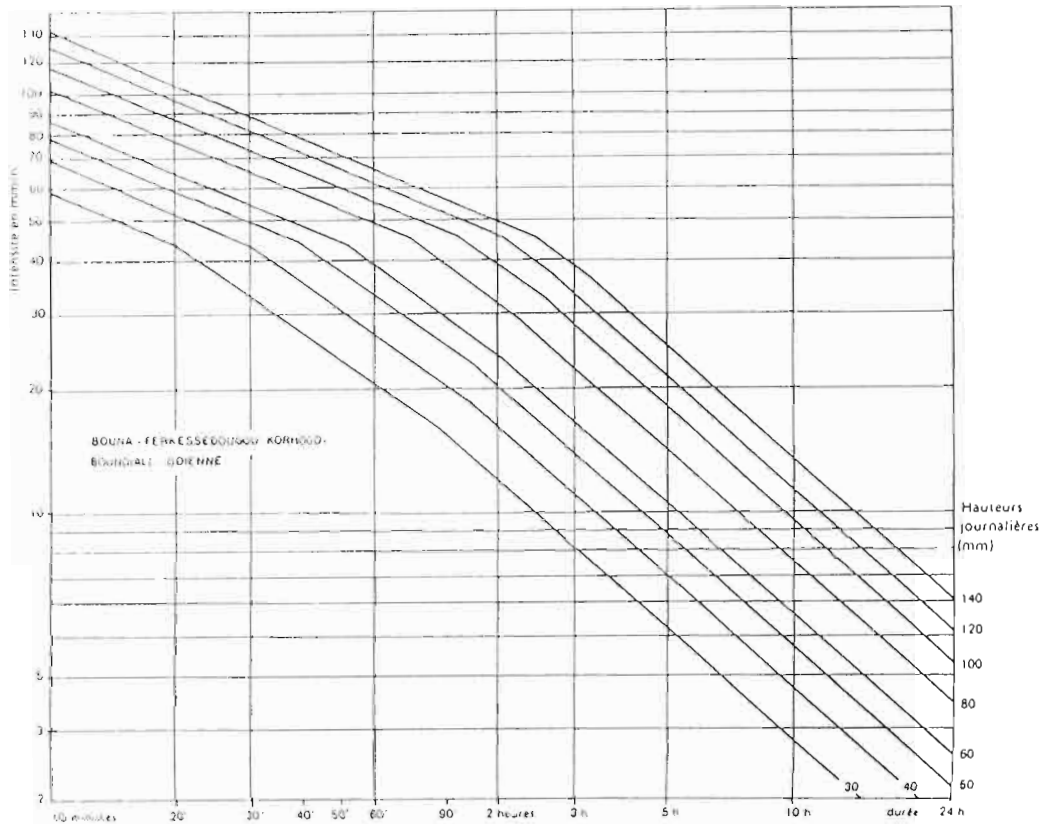
Il est cependant intéressant d'étudier l'ampleur des phénomènes d'érosion en fonction des classes de hauteur de pluie. On a constaté à Adiopodoumé que durant la campagne 1965 (mais billonné selon la pente) il n'y eut pas de ruissellement pour les pluies de hauteur inférieure à 15 mm, ni d'érosion sérieuse 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 a ainsi des seuils de déclenchement au-dessous desquels ne se manifeste aucun phénomène d'érosion (Roose, 1973) : en réalité, les hauteurs de pluie ne sont pas totalement indépendantes des intensités des pluies ... tout au moins, des intensités pendant 30 minutes et plus.

La figure 17 donne 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 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 (figure 18).

FIGURE 18

Courbes intensité/durée pour des averses de fréquence connue en chaque point, en Afrique Occidentale (d'après Brunet-Moret, 1967)



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, $R_{USA} = 50$ à 350 (Masson, en Tunisie, Kalmann, au Maroc, Heusch au Maroc, Arabi en Algérie, Pihan en France).

En zone tropicale sèche, $R_{USA} = 100$ à 450.

En zone tropicale humide, de 500 à 1200.

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 détrempe 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 (il peut aussi s'y développer des mouvements de masse si la pente est suffisante).

A l'échelle de bassins versants de plus de 2000 km², Fournier a montré en 1960 que les transports solides étaient essentiellement fonction de deux facteurs : 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 (Arnoldus, 1980).

LE MODÈLE EMPIRIQUE DE PERTE EN TERRE DE WISCHMEIER ET SMITH (USLE)

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith (1960; 1978) 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.

ANALYSE DES PRINCIPES DU MODELE

Selon ce modèle, l'érosion est 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** :

$$E = R \times K \times SL \times C \times P$$

- 1° Tout d'abord, R, **l'indice d'érosivité des pluies** est égal à E, l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I₃₀ (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure). Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

CALCUL DE L'INDICE R D'AGRESSIVITE DES PLUIES

(d'après Wischmeier et Smith, 1978)

Pour chaque averse, délimiter des périodes d'intensité uniforme.

A chaque intensité, correspond une énergie cinétique selon l'équation :

$$E = 210 + 89 \log_{10} I$$

E = énergie cinétique de la pluie exprimée en tonne métrique x mètre/ha/cm de pluie.

Intensité cm/h	,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0	121	148	163	175	184	191	197	202	206
1	210	214	217	220	223	226	228	231	233	235
2	237	239	241	242	244	246	247	249	250	251
3	253	254	255	256	258	259	260	261	262	263
4	264	265	266	267	268	268	269	270	271	272
5	273	273	274	275	275	276	277	278	278	279
6	280	280	281	281	282	283	283	284	284	285
7	286	286	287	287	288	288	289			

La valeur 289 peut s'appliquer à toutes les intensités supérieures à 76 mm/heure.

Construire un tableau de la façon suivante :

Averse Date	Hauteur totale mm	Durée en minutes	Hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm/h	Energie unitaire par cm voir table	E total	I ₃₀ mm/h
19.7.67	H=30,5	10	5,0	30	253	1265	23,0
		33	5,5	10,0	210	1150	
		32	12,5	23,4	242	3025	
		177	7,5	2,5	157	1177,5	
			30,5			6622,5	23,0
(EI) métrique = 1,735 EI USA		R index = $\frac{6622,5 \times 23}{17356} = 8,78$					

Cumuler les valeurs de R par mois/saison/année.

A cette énergie pluviale, il faut ajouter les apports d'énergie par la neige, l'irrigation et/ou le ruissellement.

L'indice R annuel n'est pas directement lié à la pluviosité annuelle. Cependant, en Afrique de l'Ouest, Roose a montré que R annuel moyen sur 10 ans = pluie annuelle moyenne x a

- a =
- 0,5 dans la majorité des cas ±0,05
 - 0,6 à proximité de la mer (<40 km)
 - 0,3 à 0,2 en montagne tropicale
 - 0,1 en montagne méditerranéenne

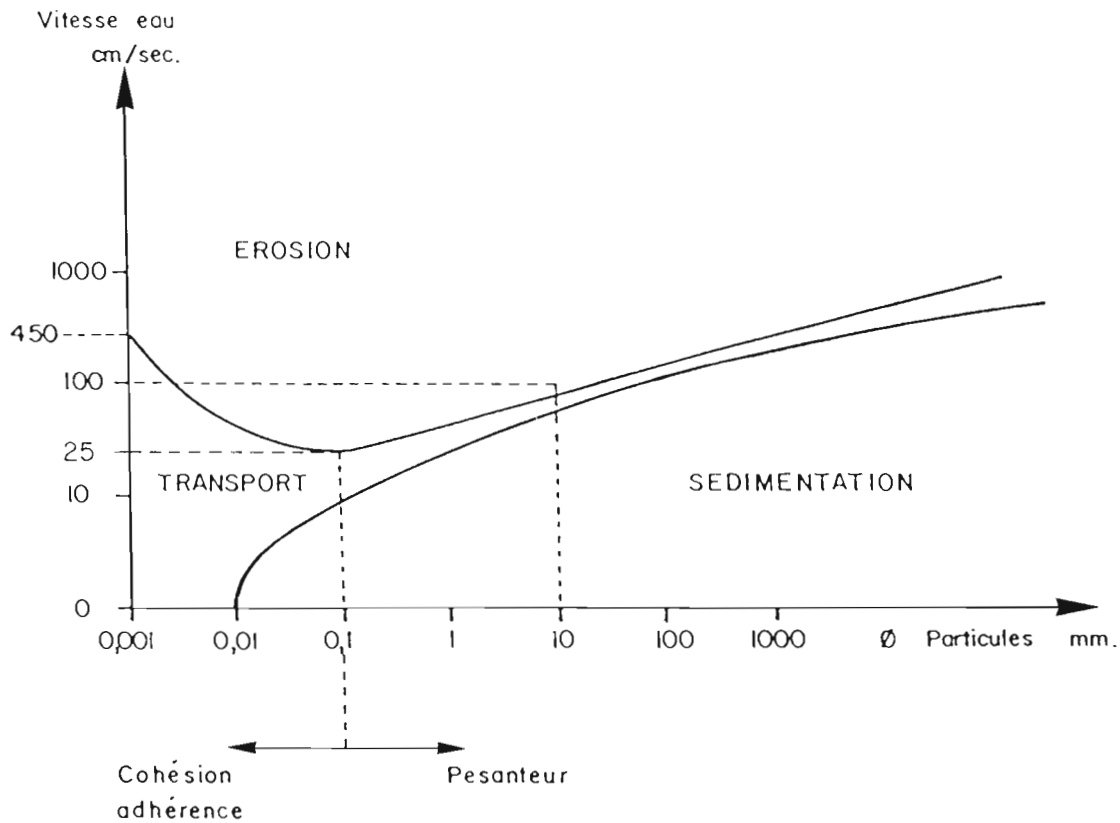
- 2° **L'érodibilité des sols (K)** est fonction des matières organiques et de la texture des sols, de la perméabilité et de la structure du profil. Il varie de 70/100ème pour les sols les plus fragiles à 1/100ème sur les sols les plus stables. Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2 m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé dans le sens de la pente et qui n'a plus reçu de matières organiques depuis trois ans.
- 3° **SL, 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, 1/100ème sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10ème 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 sols, 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 pour réduire les pertes en terre sous le seuil de tolérance (1 à 12 t/ha/an). C'est donc un modèle pratique qui convient à l'esprit d'un ingénieur qui, avec peu de données, est obligé de chercher **des solutions raisonnables à des problèmes pratiques**, de façon moins empiriques que jusqu'alors.

LES LIMITES INTRINSEQUES DU MODELE "USLE"

- Première limite :** Ce modèle ne s'applique qu'à **l'érosion en nappe** puisque la source d'énergie est la pluie : il ne s'applique donc jamais à l'érosion linéaire, ni à l'érosion en masse.
- Deuxième 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 et où les mouvements de masse sont importants.
- Troisième 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 pas valables en montagne mais on peut développer des sous-modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies, R.

FIGURE 19
Diagramme de Hjulström



Ce diagramme nous apporte des informations très importantes.

1. Les matériaux les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins de 100 microns. Les matériaux plus argileux sont plus cohérents. Les matériaux plus grossiers ont des particules lourdes qui exigent une vitesse supérieure du fluide. Il est intéressant de noter que pour Wischmeier *et al.* (1971), les sols les plus érodibles sont ceux qui sont riches en limons et sables fins.
2. Tant que les écoulements s'effectuent à une vitesse faible (25 cm/seconde), ils ne peuvent éroder les matériaux. Pour éviter l'érosion linéaire, il faut donc s'appliquer à étaler et ralentir les écoulements. D'où l'origine de la théorie de la dissipation de l'énergie du ruissellement.
3. Le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses. Mais, pour les matériaux plus grossiers que les sables fins, on passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. On comprend donc pourquoi les fossés d'évacuation des eaux de ruissellement sont soit érodés s'ils sont trop étroits ou trop pentus, soit ensablés par les matériaux grossiers qui n'arrivent pas à circuler. C'est une des raisons pour lesquelles les fossés de diversion ne donnent pas satisfaction dans les pays en développement, car il faut désabler et entretenir régulièrement les fossés et terrasses de diversion.

Quatrième 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 MUSLE 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** (Williams, 1975).

Cinquième 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.

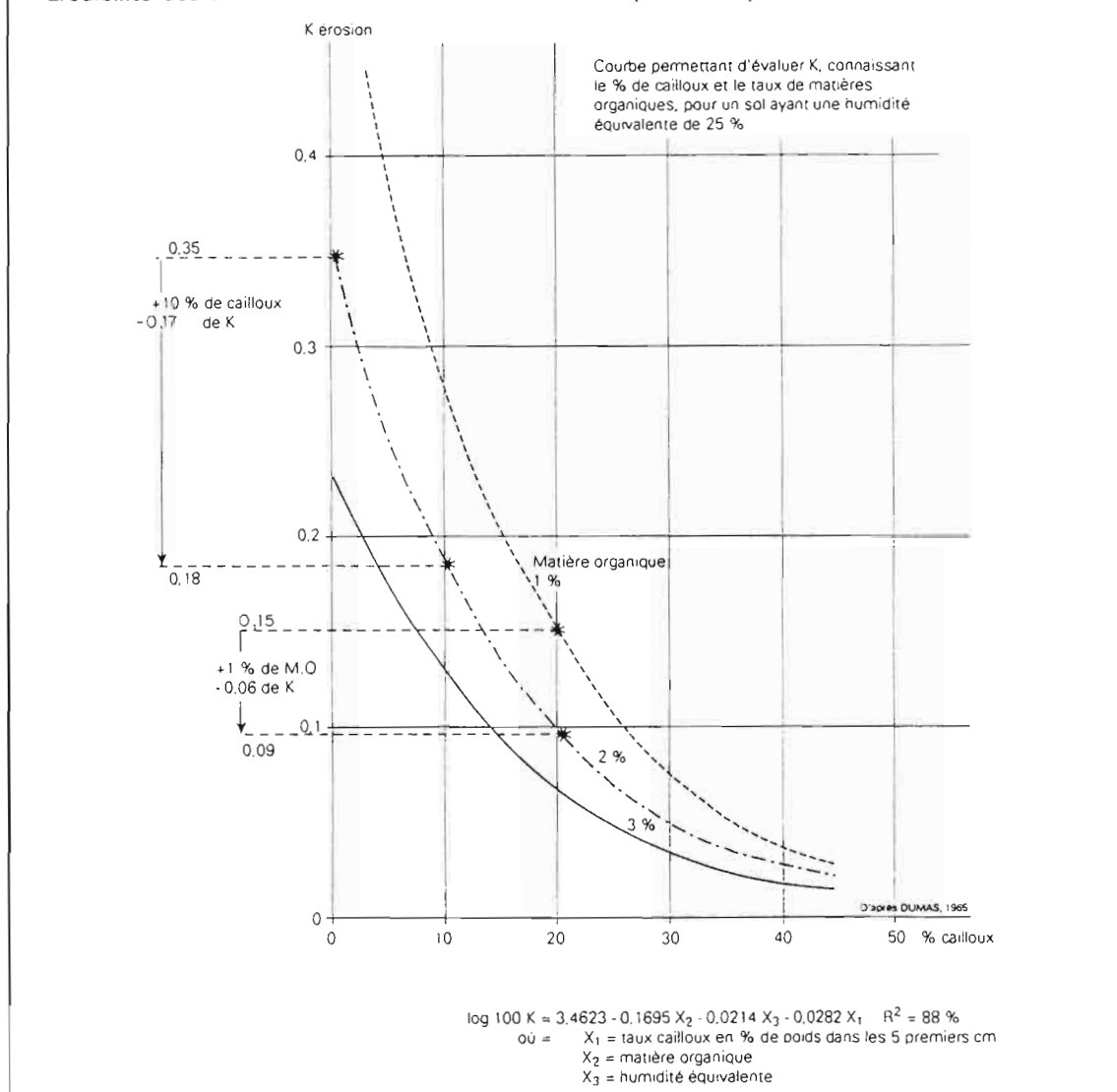
Actuellement, ce modèle sert de **guide pratique pour les ingénieurs** et se développe encore dans de nombreux pays. Mais ce modèle empirique ne **satisfait pas toujours les scientifiques** qui recherchent des modèles physiques qui s'inspirent des processus élémentaires d'érosion et qui d'autre part, 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. Le SLEMSA, modèle à valeur régionale a été mis en place au Zimbabwe (Elwell, 1981). D'autres modèles s'appuient sur l'équation de Wischmeier, tel que EPIC (Williams, 1982) 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. Il faut retenir que seul, le modèle USLE est actuellement utilisé à grande échelle dans de nombreux pays. Il faudra encore attendre une bonne dizaine d'années avant de pouvoir utiliser les autres modèles de façon courante sur le terrain. Par ailleurs, il n'est pas certain que ces modèles physiques seront plus efficaces que les versions les mieux adaptées localement des modèles empiriques actuels (Renard, 1991). Ceci vient d'être confirmé au Séminaire de Mérida au Venezuela (mai 1993).

L'ERODIBILITE DES SOLS

L'érodibilité d'un sol [planche photographique 2], en tant que matériau plus ou moins cohérent, est sa résistance à deux sources d'énergie : d'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, l'entaille 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 (figure 19). **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 d'arrachement 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

FIGURE 20
Erodibilité des sols tunisiens testés au simulateur de pluies (d'après Dumas, 1965)



stabilité de la structure vis-à-vis de l'eau. Citons par exemple, les **capsules de Ellison** (1944) où des agrégats tamisés sont soumis à l'énergie des gouttes de pluie, le **test de stabilité structurale de Hénin** (1956), 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 (Mc Calla, 1944) ou encore le **test de dispersion de Middleton** (1930) qui cherche à comparer la teneur en particules dispersées naturellement dans l'eau, avec ou sans dispersant.

Les travaux de Quantin et Combeau (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 solide moyenne des eaux augmente, et les produits entraînés sont plus fins.

$$E(t/ha) = 4,9 \log_{10} IS - 0,5 \quad \text{où } R = 0,902$$
$$C \text{ (g / litre)} = 2,47 IS - 0,1 ; \quad R = 0,904$$

Ces auteurs ont constaté que l'indice d'instabilité I_s 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 sensibles sur des vieilles défriches : ceci a été vérifié sous coton au Nord Cameroun (Boli, Bep et Roose, 1991).

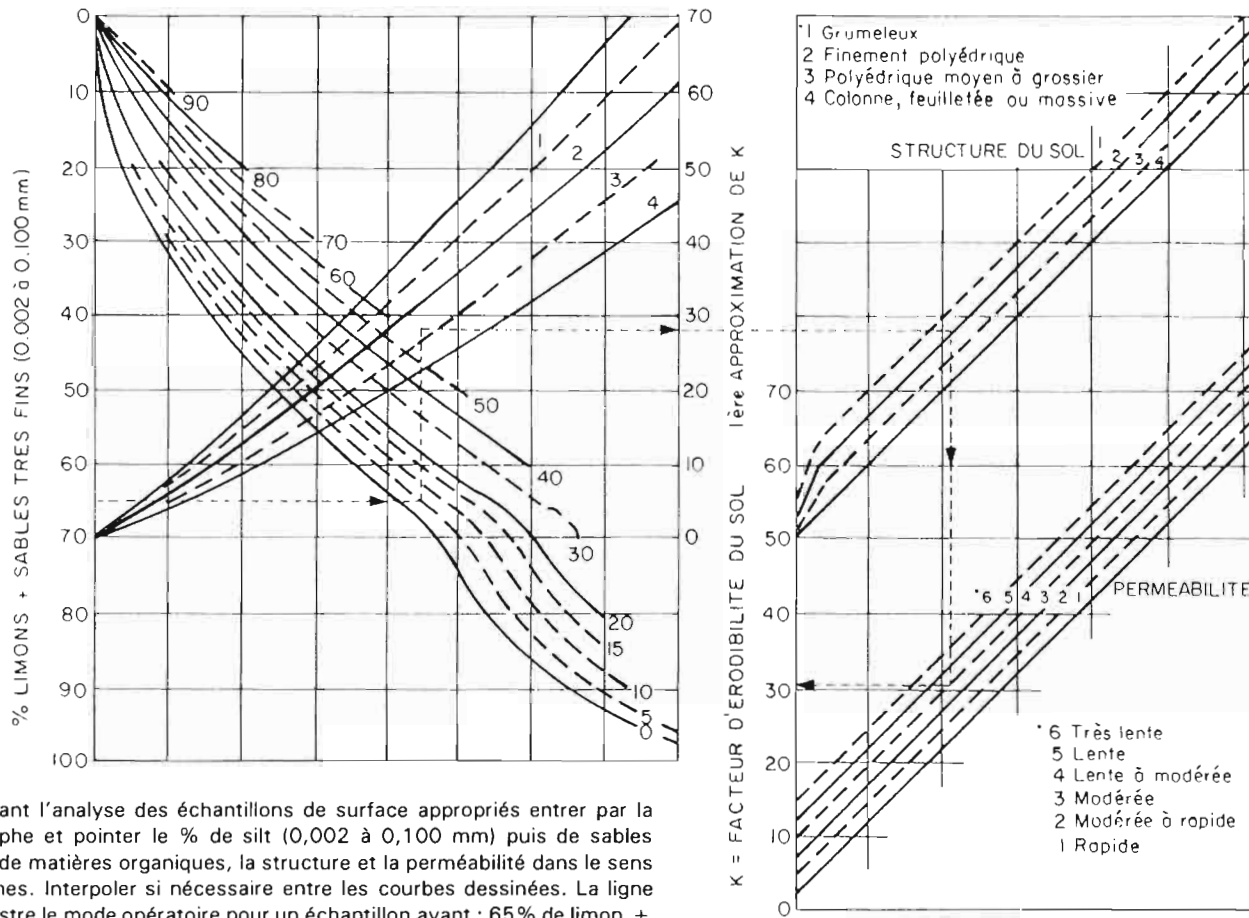
Pour se rapprocher des conditions naturelles, de nombreux auteurs ont soumis en laboratoire des populations d'agrégats prélevées dans les horizons labourés à des pluies simulées en vue de classer les sols selon leur résistance à l'érosion (Ngo Chang Bang (1967) à Madagascar, Elwell au Zimbabwe, Bryan au Canada, Moldenhauer (1971) aux Etats-Unis et bien d'autres...). Lors d'une étude comparative, Bryan (1981) a montré que selon les types de simulateur et les protocoles d'expérimentation, les sols se classaient de façons différentes. Récemment, Le Bissonnais (1988) 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 (1965) aux Etats-Unis, Dumas (1965) en Tunisie, Pontanier au Cameroun (1984) et Tunisie, Roose, Lelong et Dartoux (1992), Masson (1992) et Gril en France, Asseline et Roose (1978), Collinet (1979 et 1984), Valentin, en Afrique de l'Ouest, Asseline et Delhoume (1989) au Mexique. Travaillant sur des sols calcaires en Tunisie, sur des parcelles de 50 m², Dumas 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 (figure 20). 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 méditerranéens jeunes 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 Smith ont défini la **parcelle nue standard de référence** de 9 % de pente, 22,2 m de long, travaillée dans le sens de la pente et 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** (figure 21). Quelques années plus tard, Singer (1978), en Californie, a montré qu'il faut rajouter quelques facteurs supplémentaires dans le cas des 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, 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.

FIGURE 21

Nomographe permettant une évaluation rapide du facteur "K" d'érodibilité des sols (d'après Wischmeier, Johnson et Cross, 1971)



Procédure : En suivant l'analyse des échantillons de surface appropriés entrer par la gauche dans le graphe et pointer le % de silt (0,002 à 0,100 mm) puis de sables (0,10 à 2 mm) puis de matières organiques, la structure et la perméabilité dans le sens indiqué par les flèches. Interpoler si nécessaire entre les courbes dessinées. La ligne fléchée pointillée illustre le mode opératoire pour un échantillon ayant : 65% de limon + STF, 5% de sables, 2,8% de matières organiques, 2 de structure et 4 de perméabilité. $K = 0,31$.

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, et 0,02 pour les sols les plus résistants. En Afrique, les chercheurs (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, et 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 améliorer la résistance 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, une amélioration de 1 % des matières organiques ne réduit l'érodibilité que de 5 % (voir graphe de Dumas et le nomographe de Wischmeier). Il faut donc envisager soit, de **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.

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 (1989) a 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 (1971), sur des sols bruns lessivés d'Europe, a mis au point un indice semblable. Il faut également évaluer la capacité d'infiltration 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 Pédologique 1989, n° 1 ; numéro spécial sur l'érodibilité des sols).

LE FACTEUR TOPOGRAPHIQUE

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, 1956 ; Fournier, 1967).

TABLEAU 10

Effet de la pente sur le ruissellement (KR %) et l'érosion (t/ha/an) à Séfa au Sénégal : cultures sarclées de 1955 à 1962, sol ferrugineux tropical lessivé à tâches et concrétions (d'après Roose, 1967)

Pente %	Erosion moyenne et t/ha/an	Ruissellement moyen annuel %
1,25	5,0	7
1,50	8,6	22
2,00	12,0	30

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 glacis 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.

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 (le canal de ruissellement) et que le milieu de la parcelle 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 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, 1971 : Arabi, Roose, 1989).

L'INCLINAISON DE LA PENTE

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 dès que les pentes dépassent 15 %. Zingg, en 1940, a montré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. Aux Etats-Unis, 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 (au Sénégal), 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 10).

En **Côte d'Ivoire**, sur des cultures vivrières entre 1964 et 1976, Roose (1980) obtient un exposant supérieur à 2 sur des cultures extensives peu couvrantes telles que arachide, maïs et manioc.

Par contre, Lal (1976) 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 (1980) a comparé, pour des pentes de 4, 7 et 20 % l'érosion sur des sols nus et des sols couverts d'une plantation d'ananas, les résidus ayant été brûlés, enfouis ou laissés en surface. Il 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 dépasse largement la tolérance au-delà de 20 % de pente. 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 agressives 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** (tableau 11). En Afrique de l'Ouest, on a remarqué 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 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 12, les moyennes des pertes en terre (en t/ha/an) et du ruissellement (en % des pluies annuelles) observées durant la période de 1956 à 1972 (Roose, 1973).

TABLEAU 11

Ruissellement (KR %) et érosion (t/ha) sur sol nu et ananas en fonction des résidus de culture
(d'après Roose, 1980)

Adiopodoumé : 12 cases d'érosion sous pluies naturelles 1975-1977 : cycle de 16 mois, sol ferrallitique, pentes 4 - 7 - 20 %

RUISSELLEMENT (KR % des pluies)					
1 ^{er} cycle : 3337 mm Pluie	Sol nu	Brûlis	Enfouis	Mulch	Moyenne/ pente
Pente 4 %	44,6	7,3	1,7	0,9	13,6
7 %	34,7	4,4	1,0	0	10,0
20 %	29,3	7,5	3,4	0,1	10,3
Moyenne/ traitements	36,2	6,4	2,0	0,6	11,3
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 %	45	1,2	0,7	0,1	11,8
7 %	13,6	4,1	0,45	0	35,2
20 %	410	69	33,2	1	128,3
Moyenne/ traitements	197	24,8	11,5	0,38	58,4
Notes : Plantation en août ; les ananas couvrent bien le sol avant les pluies de juin — peu d'érosion quel que soit le traitement. Forte influence pente sur l'érosion.					

TABLEAU 12

Erosion (t/ha/an) et ruissellement (KR %) en fonction des pentes sous forêt, culture et sol nu au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (Basse Côte d'Ivoire) (d'après Roose, 1973)

Adiopodoumé 1956-1972.

Sol ferrallitique sur matériaux argilo-sableux tertiaires.

Pluie moyenne : 2100 mm.

Pente %	Erosion t/ha/an			Ruissellement KR %		
	forêt	sol nu	culture	forêt	sol nu	culture
4,5	-	60	19	-	35	16
7	0,03	138	75	0,14	33	24
23	0,1	570	195	0,6	24	24
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), si on prend pour base l'érosion moyenne sur la pente de 4,5 % ($E = 18,8 \text{ t/ha/an}$) 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 ($E = 60 \text{ t/ha/an}$). 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 sur 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 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 des mottes de sols durcis ou encroûtés. Aux Etats-Unis, Smith et Wischmeier (1960) 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 logarithmiques en réalité très voisines proposées par les autres chercheurs américains. Cette équation est de la forme :

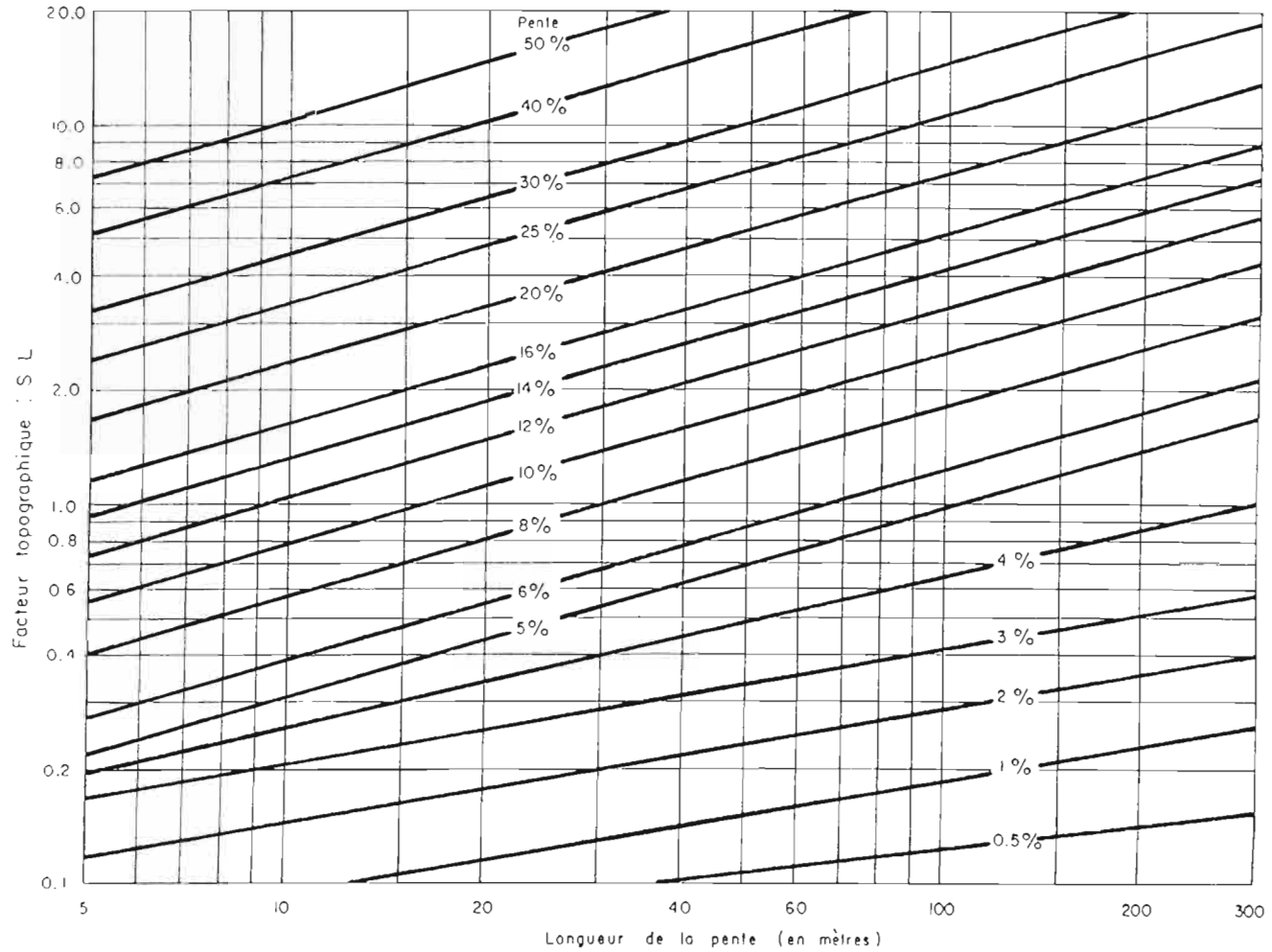
$$E = \sqrt{L}/100 (0.76 + 0.53 S + 0.076 S^2)$$

où E, l'érosion, s'exprime en t/ha, S en % et L en pieds (figure 22).

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 (type de culture et niveau de saturation du sol avant la pluie).

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 ($KR_{\max} = 98-95-76 \%$). Ces tendances se sont confirmées les années suivantes (1975-1977) sous cultures d'ananas (tableau 11). Sur sol nu le ruissellement a baissé de 44 à 35 et 29 % lorsque la pente augmente de 4 à 7 et 20 %. Sous culture d'ananas, le ruissellement augmente légèrement ou même diminue selon

FIGURE 22
Facteur topographique (d'après Wischmeier et Smith, 1978)



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.

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 la charge solide totale du ruissellement (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 % de pente. 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 oblique 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 moins ruisseler. 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 (Valentin *et al.*, 1987). 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 souvent importante dans l'explication du développement de l'érosion.

LA LONGUEUR DE LA PENTE

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. Hudson (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 (Etats-Unis) a décidé d'adopter, pour l'usage courant sur le terrain, l'exposant 0,5 pour exprimer l'influence moyenne 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, en fonction de l'humidité préalable et de l'état de surface du sol** (Wischmeier, 1966).

En Afrique, à Séfa au Sénégal (Roose, 1967) furent comparées 3 parcelles de 1,25 % de pente dont l'une, de longueur de pente 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 (KR = 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 (Verney *et al.*, 1967 ; Roose, 1976), 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 21,32 ou 41 m de longueur, montrent qu'il n'y a guère de différence de ruissellement ($KR = 4$ %) 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, Lafforgue et Valentin (1976) 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 retournée. Le sol est ferrallitique sablo-argileux ; tous les débris végétaux ont été soigneusement extirpés du terrain. Sous l'effet de la longueur de pente passant de 1 à 2 - 5 et 10 m, le ruissellement évolue 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 lorsque la longueur de pente dépasse des valeurs de 50, 100 ou 150 m.**

Aux Etats-Unis, Meyer, Decoursay et Romkens (1976) 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** (figure 23).

L'équation de Ramser a été prévue pour calculer l'écartement entre deux structures antiérosives. En pratique, les ingénieurs chargés de la conservation des sols ont adapté empiriquement l'équation de Ramser liant la dénivelée entre deux structures antiérosives (H en mètres) directement à l'inclinaison de la pente (P en %) en négligeant toutes les interactions avec la couverture pédologique et le système de production.

$$\text{Equation de Ramser : } H \text{ (mètres)} = 0,305 (a + [P \% / b]) \quad (1)$$

$$a = 2 \quad b \text{ varie de } 2 \text{ à } 4 \text{ si climat plus agressif}$$

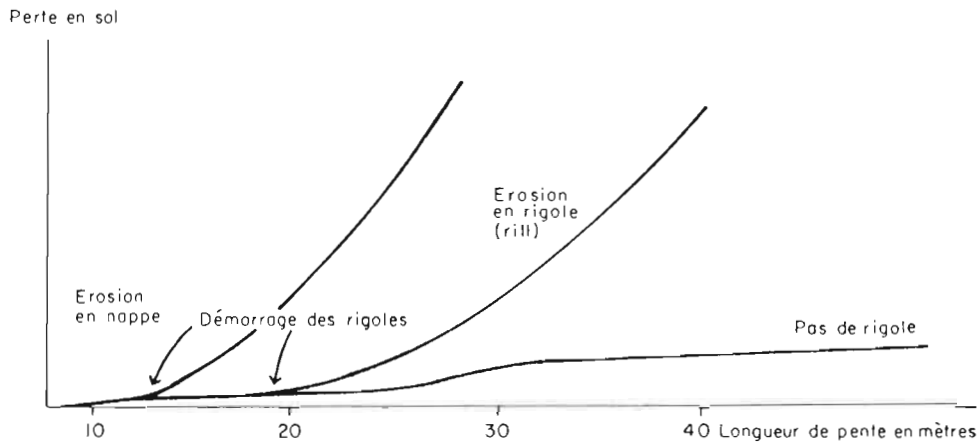
où a et b sont des paramètres que l'on fait varier empiriquement de 25 % en fonction de l'agressivité climatique ou des risques particuliers d'érosion (voir figure 24).

D'après la figure 24 (tirée de Combeau, 1977), sur une pente de 10 % :

- de Guinée, au climat agressif, $H = 1,37$ m et l'espacement = 14 mètres,
- du Burkina, moins agressif, $H = 1,62$ m et l'espacement = 16 mètres,
- de Tunisie, $H = 3$ m et l'espacement = 30 mètres.

FIGURE 23

Effet de la longueur de pente en trois sites plus ou moins sensibles à l'érosion en rigoles (d'après Meyer, Decoursay et Romkens, 1976)



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 % (voir figure 24).

En réalité, l'équation de Ramser est tout à fait incomplète car elle ne tient pas compte des interactions possibles entre l'effet de la pente, le type de sol, les états de surface et la position topographique. On a même vu que l'effet de la longueur de pente n'est pas évident sur l'érosion en certaines stations d'Afrique !

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 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 (5 à 50 m).

Saccardy (1950), en Algérie, s'est appuyé sur une évaluation de l'intensité maximale des pluies de l'ordre de 3 mm/minute pendant une demi-heure, a proposé pour les pentes :

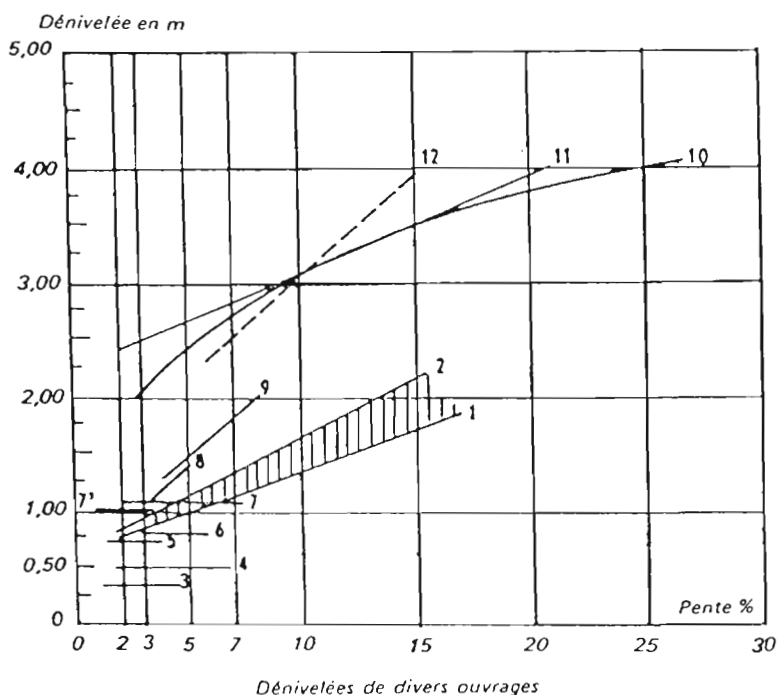
$$< 25 \% \quad H^3 = 260 P \quad (2)$$

$$> 25 \% \quad H^2 = 64 P \quad (3)$$

où H est la différence d'altitude entre deux banquettes (en mètre), P la pente du terrain en %.

FIGURE 24

Divers formules liant l'espacement entre les structures antiérosives et l'inclinaison des pentes (%) en fonction des pays d'application (d'après Combeau, 1977)



1. Utilisation de la formule de Ramser $H = 0,305 (2 + [P/4])$ au Congo et en Guinée.
2. Utilisation de la formule de Ramser $H = 0,305 (2 + [P/3])$ en conditions moins dangereuses.
3. Sols très érodés ; écartement très réduit, Burkina Faso (Ouahigouya), Mali (Sikasso).
4. Autre proposition pour Burkina Faso (Ouahigouya).
5. Autre proposition pour Burkina Faso (Boulbi).
- 6/7/8. Propositions diverses pour Boukombé (Bénin).
- 7'. Banquettes de Dabou (Côte d'Ivoire) et haies isohypses.
9. Formule de Ramser modifiée (Afrique du sud).
10. Formule de Saccardy (Algérie) $H^3 = 260 P + 10$.
11. Formule de Bugeat (Tunisie) $H = 2,20 + 8 P$.
12. Formule de l'Etat de Washington (USA) $H = 0,305 (0,58 + [P/1,7])$.

Ecartements entre les structures antiérosives en fonction des équations de Saccardy (d'après Heusch, 1986)

si pente	<	25 %	H^3	=	260 P						
si pente	>	25 %	H^2	=	64 P						
P %	0,03	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
dH (m)	1,98	2,35	2,96	3,39	3,73	4,01	4,38	4,73	5,06	5,37	5,66
dist. (m)	66,0	47,10	29,80	22,90	19,00	16,50	15,20	14,30	13,6	13,1	12,7

D'après Heusch (1986) : "il n'existe pas de justification théorique ou expérimentale de ces formules". Le facteur SL de Wischmeier, pour la distance donnée par l'équation de Saccardy, n'est pas constant : il croît progressivement de 0,4 pour une pente de 3 % et 66 m de long, à 11 pour une pente de 50 % et un écartement de 12,7 m. Tout au plus, peut-on admettre que la formule (3) peut aussi s'écrire :

$$H.C = 64$$

ce qui revient à admettre que l'énergie vient de l'eau de ruissellement si la pente est égale ou supérieure à 25 %.

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; 1977). 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 $SL = C \times L^{0,5} \times S^{1,2}$ 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 %. Elle devrait donner satisfaction dans la plupart des cas (Hudson, 1973 : Roose, 1977).

En pratique sur le terrain, plutôt que d'appliquer systématiquement 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 sur ses terres.

Les 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 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.

LES 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 de l'année où les pluies sont les plus agressives, 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 1 à plus de 1 000 tonnes lorsque toutes choses étant égales par ailleurs, 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 13).

L'INFLUENCE DES TYPES DE COUVERT VEGETAL

Le tableau 13 met en évidence l'existence de trois groupes de couverts végétaux :

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 % de pente 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 de forêt souvent très humides peut dépasser 35 % pour des averses unitaires. 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 et 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 du Bénin (Verney, Volkoff et Willaime, 1967 ; 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.

TABLEAU 13

Erosion et ruissellement à Adiopodoumé (Côte d'Ivoire) en fonction du couvert végétal, des techniques culturales et de la pente (1956 à 1972) (d'après Roose, 1973)

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 (p = 4,5)	34 à 74	60	37	71 (98)
(p = 7)	69 à 150	138	33	66 (87)
(p = 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 <i>Pennisetum purpureum</i> , <i>Guatemala grass</i> , <i>Panicum maximum</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Setaria</i>	0,1 à 1,9	0,5	4	25 (29)
- plantation tardive, faible densité, faible développement 1ère année <i>Crotalaria</i> , <i>Flemingia congesta</i> , <i>Mimosa invisa</i> , <i>Panicum maximum</i> , <i>Digitaria umfolozi</i> , <i>Centrosema</i> , <i>Titonia diversifolia</i> , <i>Stylosanthes</i>	23 à 89	40	20	62 (87)
. 2ème année				
- toutes les plantes de couverture - 2 ^e 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)
Bannanier 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
2ème année	0,1 à 0,3	0,2	3	12
Manioc et igname (p = 7 %)				
. butté 1ère année	22 à 93	32	22	53 (82)
. butté 2ème 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.

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. Par contre, nous verrons plus loin que si les feux interviennent chaque année, en particulier tardivement, les conditions sont radicalement différentes.

Les sols nus, les jachères nues ou peu couvrantes, durant les mois les plus agressifs

L'érosion est alors d'autant plus considérable que la pente est forte et le climat agressif. 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 sans quoi, la parcelle est envahie de mauvaises herbes. 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 développent une érosion qui est de l'ordre de 80 % de l'érosion mesurée sur parcelle nue.

Les couverts incomplets 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 celles 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 au tableau 13, 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 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, on ne peut pas 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, souvent deux à trois semaines après les semis en système traditionnel. Mais le labour favorise un enracinement profond et la fertilisation permet de rattraper le retard de végétation et d'augmenter la densité de plantation.

Du tableau 13, il ressort encore que l'érosion, et dans une moindre mesure le ruissellement, dépendent pour une large part de la **proportion du sol non couvert 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 des grosses averses, l'angle 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 peu d'études générales sur la dynamique du couvert des cultures et aucune technique valable pour mesurer tous les types de végétaux. On a donc utilisé différents procédés pour évaluer le couvert végétal sur les parcelles d'érosion (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,

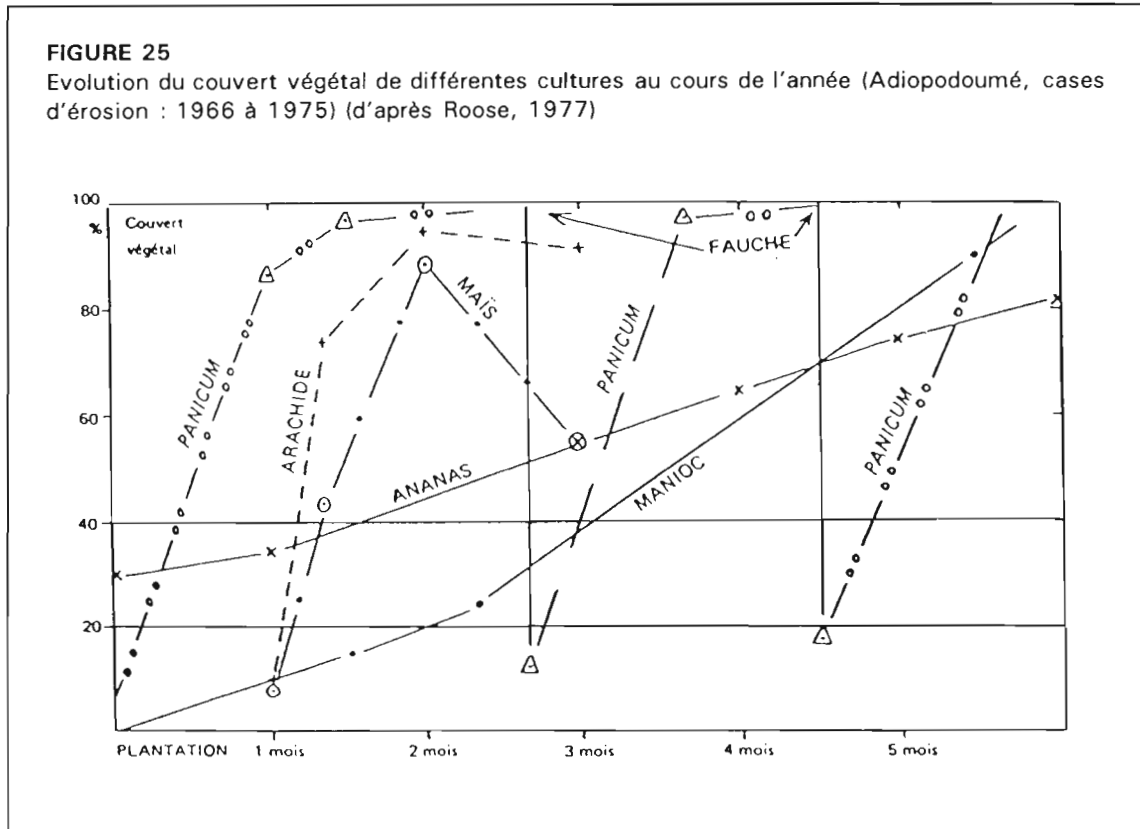


TABLEAU 14

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	Agres-sivité R _{USA}	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	20,0	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
22.9.1971	fauche									
27.9.1971	33,5	18,5	1,9	9	15,2	188	3,3	175	32	1 542
15.7.1972	fauche									
17.7.1972	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 17.7.1972				60 à 80 %		42 %		8 à 14 %		0

- 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 25 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 protectrices, suivant la vitesse du recouvrement du sol par ces plantes, notion qui doit être tempérée par celles des techniques culturales 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 l'arachide, le maïs 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 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 en paillant les surfaces des cultures peu couvrantes. Il n'est évidemment pas possible d'utiliser du paillage sous cotonniers, autre plante dégradante renommée. Le cotonnier met au moins deux mois à couvrir le sol. 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 14 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 $1/17^{\text{ème}}$ et jusqu'à $1/415^{\text{ème}}$ 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 15

Influence du développement d'une plante de couverture sous 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

Il est nécessaire de noter au tableau 13, que lorsque le couvert est incomplet, **la variabilité des résultats est très importante**. C'est une chance pour l'aménagiste, 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 aux conditions régionales, une préparation adéquate du sol, une fertilisation équilibrée, une protection 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 ont 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) (tableau 15).

L'INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU COUVERT VEGETAL (figures 26 et 27)

A la figure 26, 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 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 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 réduit l'érosion de 40 %. Si le paillage couvre de l'ordre de 40 %, on réduit l'érosion de 60 % et si l'on a couvert le sol à 80 %, on réduit l'érosion au 1/10^{ème} de celle que l'on peut trouver sur sol nu.

A la figure 27, 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.

L'ARCHITECTURE DES PLANTES

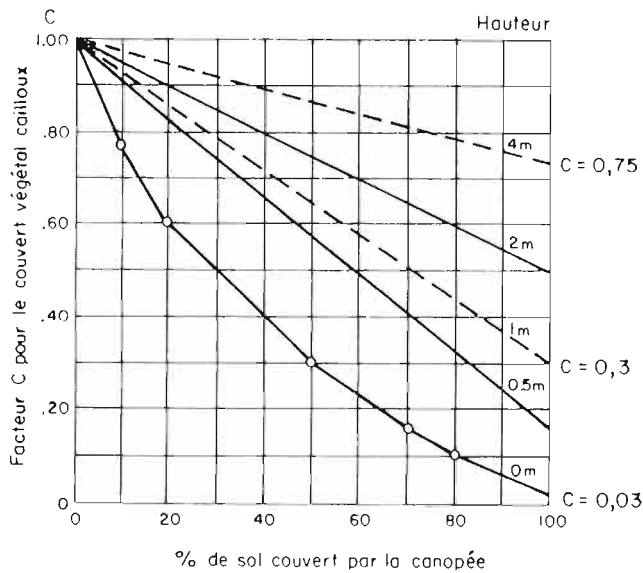
L'architecture des plantes peut également avoir un impact sur le développement du ravinement et de l'érosion. En effet, les arbres dont les feuilles canalisent les eaux vers le tronc, fonctionnent comme un entonnoir et ces eaux qui se rassemblent à la base du tronc, peuvent être à l'origine d'un cisaillement des billons qui vont drainer ensuite toutes les eaux contenues dans les sillons et provoquer un ravinement. C'est le cas en particulier, de l'ananas mais également, dans une moindre mesure, du maïs. L'autre architecture est celle des plantes "parapluie" qui renvoient à l'extérieur les gouttes d'eau et 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 de volume dans un premier temps, occupent les macropores des sols et réduisent donc l'infiltration, mais dans un deuxième temps, elles 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 (1973) a démontré en effet, que la production d'un sac de maïs provoquait 50 fois plus d'érosion en culture extensive du maïs qu'en

FIGURE 26

L'érosion est fonction de la hauteur du couvert végétal au-dessus du sol



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

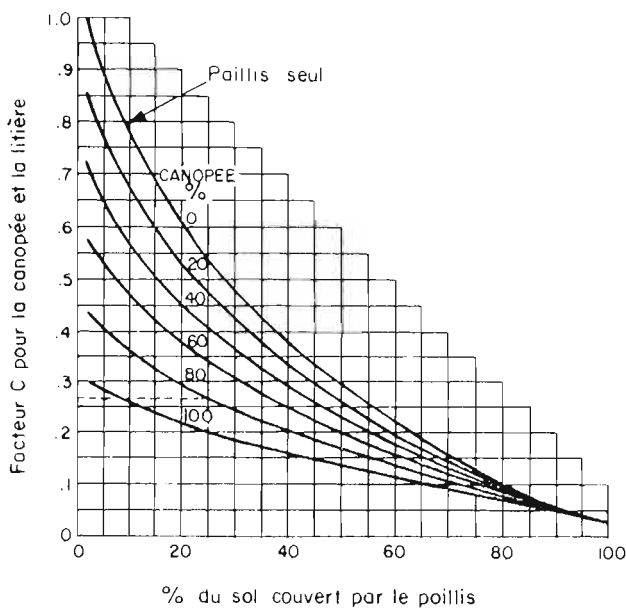
si sol couvert à 100 % par la canopée à 4 m de hauteur

si sol couvert à 100 % par une canopée à 1 m de hauteur

avec paillis (mulch) au contact du sol

FIGURE 27

Effet combiné d'une litière et d'une canopée lorsque la hauteur moyenne de chute des gouttes de pluie ne dépasse pas 1 mètre (d'après Wischmeier et Smith, 1978)



- le paillis absorbe à la fois l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement

- si le couvert du paillage est total (voisin de 100 %) :

→ peu de différence

- si le mulch est incomplet :

→ effet important de la canopée

plantation dense avec engrais. 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 observée sur des champs à forte densité. De même, **les engrais peuvent avoir un impact significatif sur la protection contre l'érosion** (tableau 16).

TABLEAU 16
Influence de l'intensification de la production sur le ruissellement et l'érosion (d'après Hudson, 1973)

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

L'INFLUENCE DE LA GESTION DES RÉSIDUS DE CULTURE

Rappelons l'essai situé au tableau 11, où la présence du couvert d'ananas et de résidus brûlés a réduit l'érosion de 200 tonnes sur sol nu à 25 t/ha et 11 t/ha si les résidus sont enfouis, mais si les résidus sont laissés en surface, à 0,4 t/ha. De même, le ruissellement est passé de 36 % en moyenne 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 pour réduire l'érosion que les résidus qui sont enfouis dans le sol** pour en améliorer sa structure.

En France, les meilleurs vignobles sont souvent situés sur coteaux. Comme la vigne couvre très peu le sol durant l'hiver et les orages de printemps (couvert végétal max = 40 %), elle pose pas mal de problèmes pour gérer les eaux de ruissellement sur fortes pentes sans entraîner trop de terre. Gril (1983) a été amené à tester, sur une vigne du Beaujolais, à l'aide du minisimulateur de pluies de type ORSTOM, l'influence de six modes de préparation du sol et de gestion des matières organiques sur le coefficient de ruissellement (% de la pluie), sur l'érosion (g/m²/heure) et sur la qualité du vin (figure 28).

Il apparaît clairement :

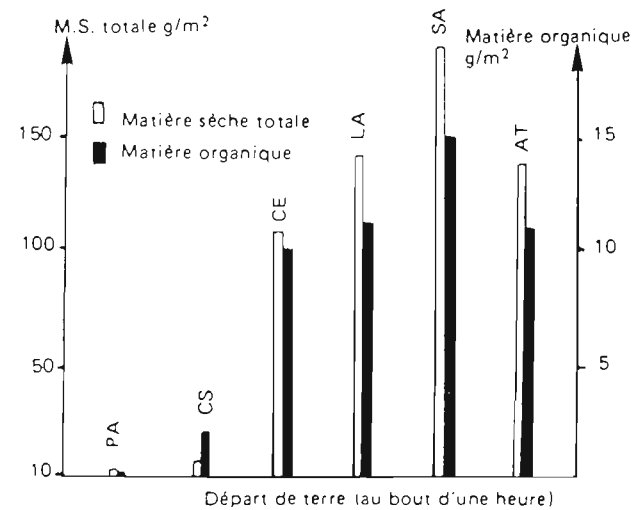
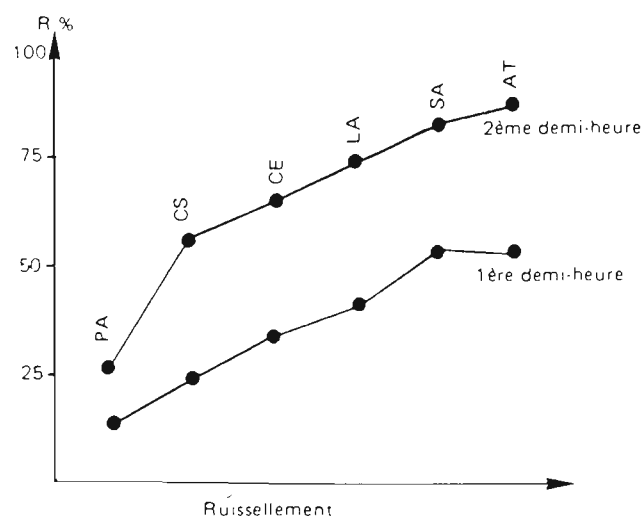
- que le labour réduit (de 15 %) le ruissellement observé sur sol non travaillé, mais n'a guère modifié l'érosion ;
- que la présence de sarments broyés aurait plutôt tendance à augmenter le ruissellement et l'érosion (+ 37 %) ; curieusement, c'est le traitement le plus mauvais !
- que le compost enfoui réduit le ruissellement (de 11 %) et l'érosion (de 24 %) par rapport au labour simple ;
- que la couverture du sol par un compost ou, mieux encore, par de la paille, est le mode le plus efficace puisqu'il réduit le ruissellement de 65 % et l'érosion de 98 % par rapport au témoin labouré, sans que la quantité, le pH et le degré alcoolique du vin n'en ait à souffrir !
- que le coefficient de variation est élevé au cours de la première demi-heure (13 à 54 %), mais qu'il diminue à mesure que la pluie se prolonge : l'état de surface est donc très variable et important à la surface de la vigne durant les brefs orages, mais les différences se confirment au cours de la deuxième demi-heure.

FIGURE 28

Effet de divers traitements antiérosifs de la vigne du Beaujolais (Pommier, France) sur le ruissellement, l'érosion et la qualité du vin (d'après Gril, 1983)

Mesures sous une pluie simulée de 60 mm/heure pendant 1 heure sur 1 m².

Traitements	Ruissellement (%)		Erosion (g/m ²) pendant 1 heure		Poids de vendage (g/cep)	Degré alcoolique	pH
	première demi-heure	deuxième demi-heure	matière sèche totale	matière organique			
Paille PA	13	26	1,8	0,18	1573	8°33	6,59
Compost (surface) CS	24	57	6,9	2,2	1499	8°69	6,71
Compost (enfoui) CE	34	66	108	9,7	1514	8°63	6,76
Labour LA	41	74	142	11	1565	8°38	6,50
Sarments broyés SA	54	83	190	15	1546	8°33	6,58
Absence de travail AT	52	87	137	11	1481	8°38	6,50
Coefficient de variation % Répétition = 4	41	13	60	44	9,30	2,80	3,65



Sur une prairie plantée trop tardivement en *Panicum maximum*, les premiers orages de mai ont battu la surface du sol mal couverte et séparé l'humus et l'argile des sables grossiers. Le ruissellement en nappe a emporté les particules légères humifères (colorées en gris foncé) et a laissé sur place des nappes de sable roux, témoins du sol érodé. Station ORSTOM d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire (pente 5 %).



En tombant sur le sol, la pluie (simulée) provoque un ruissellement en nappe qui avance lentement. Si la surface du sol est rugueuse, le ruissellement s'organise rapidement (ici au bout de 3 m) en minces filets accélérés qui creusent de petites griffes temporaires où l'eau (colorée artificiellement) circule comme dans les oueds. Station ORSTOM d'Adiopodoumé (pente 7%).



Sur cette parcelle nue, on a laissé évoluer l'érosion en nappe : celle-ci a dégagé des petits monticules de terre ($h = 2$ à 10 cm) protégés par un corps dur (croûte, racines, graines) appelés "micro-demoiselles coiffées". Le ruissellement tente de les cisiller à la base et forme des "micro-falaises". Il entraîne les particules fines humifères (grises) et laisse en surface un manteau de grains de sable roux (ferrugineux). Adiopodoumé, Côte d'Ivoire (pente 7%).



Un bon paillage, ou une plante de couverture (ici une légumineuse semée entre les rangs de maïs au 1er sarclage) suffisent pour intercepter l'énergie des gouttes de pluies, bloquer complètement l'érosion en nappe et le ruissellement. Station IITA : Ibadan, Nigeria.

Les vertisols argileux et riches en Ca sont très résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,01$ à $0,10$). Saturés en eau, ils sont sensibles au ravinement. Hyderabad, station ICRISAT, Inde.



Les sols bruns rouges subarides, limoneux et pauvres en matières organiques, sont très sensibles à la battance des pluies. Il s'y développe un ruissellement abondant qui entraîne le ravinement généralisé dès qu'on les cultive. Sabouna, Burkina Faso.



Les sols ferrallitiques profonds sont très résistants ($K = 0,10$ à $0,20$), mais dans la zone d'altération, le ruissellement active le ravinement et les lavakas qui évoluent par éboulements successifs. Ambatomainty, Madagascar.



Ces schistes, trop peu profonds, n'auraient jamais dû être défrichés. Lors d'une averse de fréquence décennale, le fossé a débordé et décapé toute la couverture pédologique. Le sol est dégradé pour des siècles. Le Cap, Afrique du Sud.



Les andosols sont très résistants à la battance, mais pulvérisés, l'horizon superficiel flotte dans les eaux de ruissellement. Pour les protéger, il faut enserrer les agrégats dans un réseau de racines : Honolulu, Hawaï.



A l'avant plan le sol ferrugineux sableux issu d'un grès calcaire est extrêmement fragile car il est riche en sable fin et pauvre en MO. A l'arrière plan, les sols vertiques noirs argileux riches en humus, issus de diorite, sont extrêmement résistants. De plus, les cultures s'y développent plus rapidement. East London, Afrique du Sud.



Le feu et la culture dégradent rapidement la matière organique de ces sols gravillonnaires très pauvres. Une longue jachère est nécessaire pour rétablir la végétation initiale. Koutiala, Mali.



Les berges des marigots sont souvent dégradées par le passage répété des troupeaux qui viennent s'abreuver et brouter les derniers pâturages verts en saison sèche. Kaniko, Mali.



La culture du coton exige l'arrachage de tous les résidus pour des raisons sanitaires : ceci entraîne le déséquilibre organique du sol et la dégradation de son potentiel de production, malgré le parc de karité. Kaniko, Mali.



Pour permettre le labour mécanisé, il a été nécessaire d'arracher toutes les souches. Au bout d'une dizaine d'années, l'horizon humifère sableux a été décapé, laissant apparaître une croûte compacte et imperméable constituée du fond de labour. Le ruissellement est alors si fort qu'il emporte les graines et les résidus organiques fertilisants et empêche toute restauration du sol. Baramandougou, Mali.



En Afrique, le feu peut avoir cinq fonctions : le défrichage, la chasse, la lutte contre les parasites, l'entretien des pâturages et la manifestation du mécontentement de la population vis-à-vis de l'Administration (forestière en particulier). Korhogo, Côte d'Ivoire.

Lorsque le feu est allumé précocement, c'est-à-dire un mois après la dernière pluie utile, il court rapidement à travers la savane et sélectionne les espèces arborées résistantes au feu : on obtient une savane arbusculaire composée exclusivement d'espèces pyrophiles. Station de Kokonodekro, Côte d'Ivoire.



Lorsque cette même zone est mise en défens depuis trente ans, la savane évolue en forêt sèche où les lianes et les espèces forestières remplacent les graminées susceptibles de transmettre le feu. Station de Kokondekro, Côte d'Ivoire.

Le feu est un instrument essentiel pour l'élevage : il permet de régénérer les ressources fourragères durant la saison sèche. On note ici la limite entre la zone brûlée tardivement depuis trente ans et la savane arborée environnante. Station de Kokondekro, Côte d'Ivoire.

Une très large partie de l'Afrique actuellement sous savane retournerait naturellement à la forêt si on la protégeait des feux et du pâturage.

Après que le buttoir du Caterpillar ait renversé les troncs des principaux arbres, le râteau passe pour arracher le réseau racinaire et le séparer de l'horizon humifère. Le sous bois, les racines et les troncs, tout est roulé dans un nuage de poussières jusqu'à l'andin, en bout de parcelle où l'on entasse la biomasse et les nutriments accumulés pendant 20 à 150 ans. Ibadan, Nigéria.

Après le passage du buttoir et du râteau, la surface est plane mais la litière et l'humus ont disparu. Le sol est dénudé, prêt à être battu par les pluies et transformé en borbier, puisque le réseau racinaire a été arraché et le sol pulvérisé par les chenilles.



Quand on ne peut défricher à la scie mécanique et débarber progressivement, on propose l'usage de la lame KG formée d'un éperon pour éclater les souches et d'une lame qui va scier la souche au ras du sol.

Après le passage de la lame KG, la surface du sol est encore couverte par la litière, les souches restent dans le sol tout comme le réseau racinaire. Le sol souffre beaucoup moins de ce mode de défrichement.

S'il n'est pas possible de laisser en place les branches (car le travail du sol est motorisé), mieux vaut brûler sur place le menu bois pour y libérer la minéralomasse plutôt que de la pousser sur les andins.

Pour créer un bois de village, le chef de terre a donné le terrain le plus mauvais ! Après défrichage, et récolte des piquets pour former la clôture contre la divagation du bétail, on ouvre les potets. Comme le sol gravillonnaire est très pauvre et stocke très peu d'eau, finalement rien ne pousse et la terre est encore plus dénudée qu'avant. Si par bonheur les jeunes arbres se développent avant que les piquets, grignotés par les termites, ne s'écroulent, personne n'assure l'entretien du massif, ni les éclaircies nécessaires car on ignore qui est le propriétaire du bois : l'Etat ou les paysans ? Yatenga, Burkina Faso.



Reforestation sur demi lune sur cuirasse gravillonnaire : dans cet exemple, les eaux ont surtout profité aux graminés annuelles mais quelques arbres survivent encore au bout de six ans (acacia, neem, eucalyptus). En dehors de la zone gravillonnaire, les demi-lunes disparaissent en un ou deux ans sur ces sols sableux très fragiles. Gourga, Burkina Faso.

Reforestation sur alignement de pierres. Après aménagement en cordons pierreux continus disposés en demi lune, les villageois ont planté sous grillage divers arbres autochtones (à peine visible au premier plan) et des eucalyptus. Le sarclage est assuré par les femmes qui ont la permission de faire une culture d'arachides : les eucalyptus ont bien profité des eaux de ruissellement. Au premier plan les piquets soutenant le grillage sont détruits par les termites au bout de 3 ans ; coût du grillage : 10 000 FF/ha ou 2000\$, ce qui empêche de généraliser son usage. Ilonga, Burkina Faso.





Protection des arbres autour des habitations par un fagot d'épineux, un panier tressé ou un muret de briques à claire voie. Yatenga, Burkina Faso.

Certains paysans ont développé des variantes forestières de la méthode du Zaï (voir plus loin). Au sarclage, ils préservent quelques tiges forestières provenant des graines contenues dans la poudrette enfouie dans la cuvette du Zaï. Après cinq ans, lors d'une première éclaircie, on choisit quelques tiges pour créer un parc d'acacias. Le reste est rabattu pour produire du bois de feu. Cet aménagement a un effet très positif sur la restauration de la fertilité des sols, sur le ruissellement, sur l'érosion hydrique et éolienne car les arbres piègent les feuilles et les limons soufflés par le vent sec (harmattan). Gourga près de Ouahigouya, Burkina Faso.



Bocage de haies vives : Ziga, près de Ouahigouya, Burkina Faso. Dans une zone dénudée, un projet du Centre Régional pour l'Agriculture (CRPA) a sélectionné différentes espèces capables de former des haies vives. Acacia nigritiana s'est montré efficace non seulement pour créer une haie résistante au bétail, mais aussi pour réduire l'érosion éolienne. Sous sa protection, un tapis herbacé s'est développé naturellement qui ralentit le ruissellement et l'érosion en nappe. Ailleurs, le Ziziphus mauritiana a été préféré par les paysans car il est aussi résistant mais peut fournir du fourrage et des fruits vendus sur les marchés.

La banquette algérienne de diversion a été conçue pour évacuer les eaux de ruissellement du champs (fragilisé par le travail du sol) vers un exutoire protégé. Pour tenir compte de l'augmentation des apports d'eau, la pente du canal doit augmenter de 0,2 à 0,4 %, mais ici les eaux s'accumulent en un point bas et risquent de déborder, de raviner le versant ou de provoquer des glissements. La reforestation en Pins d'Alep par les forestiers sur les terres communales n'est pas respectée : les plus beaux arbres sont prélevés avant maturité et la litière de Pin n'améliore guère le sol ou très lentement. Milliana, Algérie.



Des banquettes ont été construites sur les versants d'un plateau calcaire pour favoriser l'infiltration et la croissance d'arbres fruitiers. Aucune trace de ruissellement, ni sur le versant, ni dans l'exutoire ! Le bon état de ces banquettes ne suffit pas pour justifier cet investissement ! Y a-t-il des risques graves de ruissellement ? Bel Mezioude, Algérie.

La croûte calcaire de ce sol brun a été défoncée par un sous-solage profond. Les pierres ont été rangées en cordons isohypses : à défaut d'arrêter le ruissellement, elles ont servi à construire de nouvelles habitations. On peut se demander si les pierres sont plus efficaces entassées sur des cordons ou étalées à la surface du sol où elles interceptent l'énergie des pluies et du ruissellement ? Bel-Mezioude, Algérie.





Cette colline, complètement ravinée, a été reforestée en Pins d'Alep voici quinze ans ; à cause du surpâturage, le sol est encore presque nu ! Cet investissement sur les plus mauvaises terres est-il rentable ? Pourquoi les paysans ne respectent pas ces efforts de l'Etat pour sauvegarder leur environnement ? Probablement parce qu'ils considèrent que les plantations d'arbres sont une tentative d'appropriation des terres par l'Etat. Oued Isser, Algérie.

Reforestation d'un "bad-land" après remodelage en banquettes d'un massif marneux. Au bout de douze ans, les Pins d'Alep ont atteint 3 m sur les banquettes, mais couvrent moins de 50 % de la surface du sol (trop peu pour maîtriser l'érosion) et sont attaqués par la chenille processionnaire ! Il serait sage de diversifier les espèces plantées et introduire un sous-étage herbacé. Seghouane, Algérie.



Reforestation d'une colline semi-aride (pluie de 250 à 350 mm) après remodelage en gradins. Après 17 ans, le taux de reprise des pins est satisfaisant, mais leur taille et le taux de recouvrement du sol est très faible à cause du pâturage et de la sécheresse. L'intervention musclée des forestiers sur ces terres communales de parcours dégradés n'est guère appréciée par "les bénéficiaires" : pour protéger le barrage il faut trouver d'autres stratégies et des compensations pour les paysans pauvres dont l'élevage est la seule ressource. Relizane, Algérie.

Pour ralentir le ruissellement en nappe, étaler les crues, piéger les matières organiques et les sables, les paysans dressent des alignements de pierres, de branches, ou d'herbes qui laissent passer les eaux excédentaires. Ces alignements peuvent aussi servir pour délimiter les parcelles et montrer ainsi les limites de la propriété. Yatenga, Burkina Faso.

Alignement de pierres consolidées par une ligne d'herbes au Yatenga, Burkina Faso. Les paysans peuvent consolider leurs cordons pierreux par un semis d'Andropogon. Ceci permet d'économiser 50 % des pierres nécessaires. On peut en profiter pour réduire l'espace entre les cordons sachant que leur action améliorante est limitée à 5 m sur les pentes de 2 %. L'Andropogon remplit de multiples fonctions : fourrage vert en saison sèche, paille pour les toits et différents usages pour l'artisanat.



Dans les ravines et là où le ruissellement en nappe ravinante est trop rapide, on est obligé de construire avec des gros blocs de latérite une digue perméable dont le sommet horizontal permet de ralentir les crues, de recharger la nappe et de piéger les matières fertilisantes. Digue filtrante au Yatenga, Burkina Faso.



Ces vingt dernières années furent construites au Yatenga, des diguettes en terre sur 45 000 hectares. Cependant, deux ans plus tard, rares sont celles qui sont encore fonctionnelles. En effet, il s'agit de digues de diversion qui évacuent les eaux de ruissellement dans les parties basses du paysage et en particulier dans les pistes ! Quand ils constatent que les digues engorgent les parcelles à l'amont tout en desséchant le sol à l'aval, les paysans cassent ces diguettes pour rétablir l'irrigation de leur terre avec les eaux provenant du sommet de la colline. Cette méthode de diversion est à éviter dans la zone soudano-sahélienne où les micro-barrages perméables sont mieux adaptés. Ouahigouya, Burkina Faso.

Terrasses ou gradins méditerranéens construits au 14^{ème} siècle par les Incas à Machu-Pichu, irrigables et encore cultivées en céréales. Cette méthode exige un énorme investissement en travail (600 à 1200 jours/ha) et en amendements (3 à 10 t/ha/3 ans de fumier + 2 à 5 t/ha/2 ans de chaux). Elle n'est acceptable que si la terre est rare, la main-d'oeuvre abondante et bon marché, et la culture rentable [photo De Jaegher].



Murets de pierres dans les vallées : systemas andenes à Cuzco, Pérou. Pour valoriser les colluvions piégées dans les vallées, les paysans ont construit des murettes en pierres permettant de gérer les eaux de ruissellement et de protéger les terres cultivées [photo De Jaegher].



Au Népal, les versants jusqu'à 60 % de pente sont aménagés de manière traditionnelle en petites terrasses progressives étroites. Les talus sont enherbés. Les pentes les plus vives sont couvertes de prairies fauchées. Les fonds de vallées sont irrigués et cultivés intensément. District de Gulmi, Népal [photo Ségala].



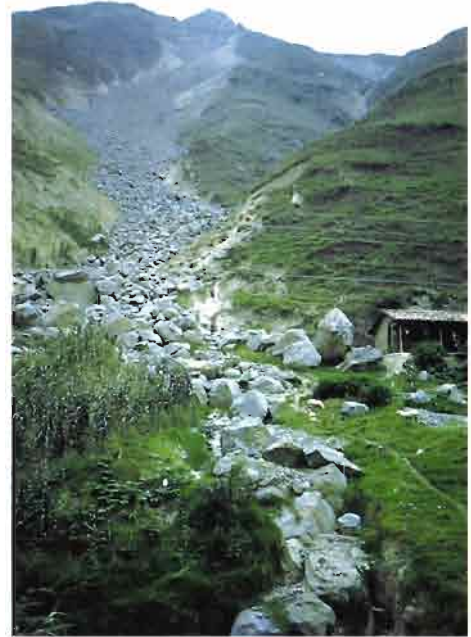
Sur les fortes pentes qui entourent le lac Léman, Suisse, les vigneron ont construit des murets en pierres cimentées ainsi qu'un réseau de routes stabilisées drainant tout le versant. Enfin, la surface des champs est protégée par un lit de cailloux absorbant l'énergie des gouttes de pluie. En principe, les vignes se développent rapidement à l'abri de ce mulch de cailloux. La vigne permet d'amortir de tels investissements.



Glissement en lave torrentielle à Khef el Hamar, près de Médéa, Algérie. Un pan de colline s'est effondré dans la ravine lors d'une pluie exceptionnelle formant une lave torrentielle rouge de 1 km de long. Il s'agit de marnes gypseuses donnant lieu à la suffosion (érosion en tunnel par dissolution du gypse).



En montagne, après des pluies diluviennes saturantes, la gravité associée au ruissellement et aux alternances gel-dégel provoque le mouvement d'énormes éboulis rocheux (pierriers). Equateur [photo De Noni].



Glissement en coup de cuillère : Biscuicy, Venezuela. Les versants schisteux (ou marneux) donnent naissance sur fortes pentes à des décrochements qui basculent en contre pente comme si l'on y avait donné un coup de cuillère. Par la suite, il s'accumule de l'eau au pied de la contre pente qui peut donner naissance à une ravine laquelle efface les traces du glissement.

Ces glissements en planche de la couverture pédologique sur schiste illustrent les dangers d'exploitation des pentes vives, déséquilibrées par les pistes et le surpâturage. District de Gulmi, Népal [photo Ségala].

Profonde ravine en "V" dans un massif marneux d'el Azizia, Oued Isser, Algérie. La pente qui intercepte les vents humides est en équilibre et couverte de végétation ; la pente sèche est raide, instable, sapée à la base et dénudée. Les versants reculent à mesure que la marne s'altère et que le ruissellement chasse les sédiments accumulés au fond de la ravine. Une simple seuil en grillage suffit parfois pour stabiliser les versants.



Les arbres n'arrêtent pas le ravinement, une fois qu'il est déclenché. Les racines peuvent aider à armer les berges, mais lors des crues les plus fortes, les eaux tourbillonnent autour des souches et creusent les berges. Vénézuéla.

Ravine en "U". Lorsque le matériau cisailé par le ruissellement est hétérogène, la ravine développe des lèvres verticales et évolue par éboulement suite à la pression de la nappe phréatique à la base. C'est le cas des "lavakas" de Madagascar où le ruissellement pénètre d'abord les horizons résistants, riches en argile et en fer, puis les altérites ferrallitiques particulièrement peu cohérentes.



Ravinement en tunnel, Oued Mina, Algérie. Dans les marnes gypseuses, les eaux s'infiltrent par des fissures, dissolvent les sels solubles et creusent des tunnels à l'origine de ravinements difficilement maîtrisables. On peut trouver des phénomènes semblables dans les vertisols profondément fissurés et lorsque des animaux fouisseurs provoquent la pénétration des eaux de surface dans leur tunnel.



Pour traiter une ravine sur marnes situées à faible distance d'un barrage (Oued Sikak, Algérie), l'ONTF a construit de gros ouvrages en gabion. Or au bout de 5 ans, il n'y a toujours pas de sédiments piégés ! Il semble que cet énorme investissement soit inutile : cependant, il se pourrait que les seuils se remplissent lors d'une averse de fréquence rare.



A Madagascar (plateau central), les paysans excellent à transformer les ravines en casiers rizicoles. A l'aide de mottes d'herbes, ils réalisent des murettes en terre qui retiennent l'eau et les boues apportées par l'érosion des berges et des collines soumises aux feux de brousse : ils y consacrent ensuite tout le fumier disponible. Les collines ne portent que de maigres cultures peu exigeantes (manioc et parcours extensifs).



Jardins de ravine : Petite vallée de Nippe, Haïti. Comme les roches basaltiques s'altèrent rapidement, il est possible de piéger des sédiments fins derrière des seuils en sacs plastiques remplis de terre : ceux-ci doivent être protégés du soleil. La terrasse formée est alors fumée et plantée de cocotiers, bananiers, manguiers, canne à sucre et divers fourrages.



De la route de crête, le ruissellement a creusé une jeune ravine dans la couverture pédologique. Aussitôt, le paysan l'a plantée de bananiers, de bambous, de cannes à sucre et de diverses herbes fourragères. L'énergie du ruissellement est dissipée sur les végétaux et la ravine est stabilisée. Jacmel, Haïti.

En tête de ravine, on a implanté une série de seuils en gabion, en pierres sèches, ou en grillage. Dès la deuxième année, les ouvrages se sont trouvés recouverts de sédiments et il a fallu les rehausser pour atteindre la pente d'équilibre permettant au versant de se couvrir de végétation naturelle. Souagui, Algérie.



Une ravine aménagée se comporte comme un oasis linéaire. Trois ans après l'aménagement des seuils et la plantation des arbres dans les sédiments, la ravine s'est couverte de végétation naturelle qui contraste avec l'aridité du milieu environnant. Etant donné le coût important de l'aménagement des ravines, il est intéressant de valoriser ces aménagements et d'y intéresser les riverains. Souagui, Algérie.



Derrière les seuils en pierres sèches s'est accumulée une masse de sédiments de quelques mètres cubes. Dans les pores de ces sédiments s'est infiltrée l'eau qui représente 20 % en eau libre et autant en eau absorbée utilisable par les plantes. Après deux ans d'aménagement, la masse des sédiments a donné naissance à une source qui, une fois captée, a permis d'irriguer quelques arbres. Souagui, Algérie.



Seuils légers constitués de grillage de fer ou de plastique (à maille d'un cm) tendu sur des fers cornières de 2,5 m enfoncés sur 50 cm dans le sol et stabilisés par des tendeurs en fil de fer galvanisé. Leur efficacité s'est avérée au moins égale et même supérieure aux gabions susceptibles de souffrir de renards, tunnels sous le seuil qui peuvent vider tous les sédiments accumulés en une seule crue. Le prix de ce seuil varie de 30 à 20 % du prix des gabions. Souagui, Algérie.

Nuage de poussières fines (en suspension) soulevées à l'approche d'une "tornade" à Déou, NE du Burkina Faso [photo Ségala].



Formation d'une petite dune sur le fond d'une cuvette de débordement du fleuve Bani, Mali. Le sol est revêtu d'une croûte de sédimentation, lacérée par les grains de sable qui circulent en nappe à sa surface. Dès que des herbes arrivent à s'installer, le vent est ralenti, les grains de sable sont piégés. Il se forme alors une petite dune (Nebkra) laquelle sera à l'origine du redémarrage de la végétation (piégeage des graines et de l'eau).



Envahissement d'un paysage texan par les dunes de sable : saltation à "Big Sprint" [photo Fryear].



Reg à la surface d'un sol brun calcaire érodé : Darna, province de Cyrénaïque en Libye. Ces plateaux de sols bruns calcaires semi-arides sont balayés par les vents et le ruissellement qui poussent les particules fines jusqu'en bas de pente et dégagent la croûte calcaire : c'est ainsi que se forme un "reg". L'olivette est un des derniers témoins de la forêt primitive de cette région qui fut jadis le grenier à blé des romains.



TABLEAU 17

Effet du feu de brousse sur le ruissellement d'une parcelle (Gonse : 1967-1973) (d'après Roose, 1979 ; Roose et Piot, 1984)

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

L'EFFET DES FEUX DE BROUSSE [planche photographique 4]

Sous savanes ou 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 (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 (tableau 17). 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 ravageurs.

Les feux tardifs comme on peut en voir dans les savanes soudaniennes et soudano sahéniennes 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 au moins un an. Les averses orageuses battent alors la surface du sol et forment une pellicule de battance très peu perméable qui donne naissance à d'abondantes nappes de ruissellement.

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 (tableau 18). En 1971, le ruissellement est très élevé ; il atteint 40 et 50 % 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 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

TABLEAU 18

Influence de la protection intégrale sur le ruissellement mesuré sous deux jachères* (Saria, Burkina Faso)
(d'après Roose, Arrivets et Poulain, 1979)

Années	1971	1972	1973	1974
Précipitations mm	602	724	672	714
Ruissellement :				
- sur jeune jachère KRAM %	20	5	6	8
KRMAX %	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*
- sur vieille jachère	17	9	10	35*

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

coefficients de ruissellement moyens et surtout maxima sont aussitôt remontés de plusieurs pour-cent sans pour autant retrouver le niveau initial car les souches d'herbes sont reparties vigoureusement dès les premières pluies et la mésofaune n'a pas trop souffert.

L'EFFET DU MODE DE GESTION DU FEU SUR LA NATURE DU COUVERT VEGETAL

A quelques kilomètres de Bouaké (centre Côte d'Ivoire), le CTFT a installé dans les années 1950, un essai très démonstratif sur l'effet du feu sur la savane guinéenne (pluie 1 200 mm en quatre saisons) de la station forestière de Kokondekro.

Sur un sol ferrallitique de versant, trois parcelles d'un hectare furent isolées par des coupe-feux et soumises chaque année soit au feu tardif, soit au feu courant précoce, soit à la protection intégrale. Au bout de trente ans, on pouvait faire les observations suivantes :

- sur la parcelle soumise aux feux (annuel, tardif), la végétation arborescente a pratiquement disparu pour laisser la place à une savane herbacée ;
- sur la parcelle soumise aux feux courants précoces, un mois après la dernière pluie utile, de hautes herbes partagent la surface avec une végétation arbustive, pyrophile, rabougrie, difforme, mais assez abondante ;
- sur la parcelle protégée intégralement (à peine deux feux accidentels en 30 ans !), les herbes ont pratiquement disparu : elles ont été étouffées par une forêt secondaire très dense, riche en lianes et en sous-bois, beaucoup plus vigoureuse que la savane environnante brûlée presque chaque année, composée de grands arbres dominants (10 à 30 arbres/ha) et d'un mélange de hautes herbes et de nombreux arbustes.

Bien qu'on n'ait malheureusement aucune donnée sur l'évolution du sol ni sur le ruissellement, on peut observer que le feu a une influence déterminante sur le développement des graminées et des arbres et sur la diversité des espèces en présence.

L'EFFET DES TOUFFES D'HERBE

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 100 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 herbes croissent, plus elles couvrent la surface du sol et dévient les gouttes de pluie de leur trajectoire 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 et le volume d'infiltration. Ce freinage par les tiges des herbes est cependant plus efficace pour le piégeage de la charge solide que pour la réduction du volume ruisselé.

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 composition botanique pourvu qu'il atteigne 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 le couvert végétal qu'il faut s'adresser en priorité pour améliorer l'économie de l'eau, l'infiltration, la production de biomasse et la conservation du sol. Elwell (1981) a trouvé qu'il suffisait de couvrir 40 % du sol par les cultures pour réduire l'érosion de 80 % sur des oxisols au Zimbabwe, sols plus résistants que ceux que nous avons testés. Ceci montre bien les interactions qui peuvent exister entre le couvert végétal et le type de sol sur l'érosion.

L'INFLUENCE DES TECHNIQUES CULTURALES [planche photographique 17]

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, voire 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, concerne 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 à la fois mécaniques et biologiques**.

TABLEAU 19

Effet d'un labour à la houe (Adiopodoumé, p = 7 %) (d'après Roose, 1973)

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

TABLEAU 20

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) (d'après Roose, 1973)

Date	Pluies		Ruissellement %			Erosion kg/ha			Turbidité gr/m ³		
	Hauteur mm	Erosivité R	4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %
30.3	31,0	30,5	79,0	64,1	44,2	2494	4793	30 284	273	664	1225
6.4	36,0	17,4	48,7	53,6	12,1	1003	2250	4795	23	47	110
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	37,8	15,5	3,3	946	145	383	4281	5502	8562
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	624	2719	2467
21.5	23,5	10,8	53,8	30,1	6,3	989	859	2031	678	1483	3992
29.5	35,0	17,3	46,9	34,8	15,2	1708	3074	23 278	810	784	968

TABLEAU 21

Réaction à la pluie en fonction du mode de préparation d'un sol nu ferrallitique gravillonnaire : CIRAD-Bouaké (d'après Kalms, 1975)

Année	Pluie		Ruissellement (% annuel) des pluies érosives				Erosion (t/ha/an)				Turbidité (mgr/l)			
	h (mm)	R _{USA}	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	-	-	-	-	-
1972	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

L'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 19, nous reportons l'effet sur l'érosion d'un labour à la houe au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (pente 7 %, sol ferrallitique très désaturé sableux). On constate une augmentation de l'érosion et une diminution du ruissellement sur la parcelle nue labourée.

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

En effet, le labour augmente temporairement la porosité du matériau mais diminue sa cohésion. Au tableau 20, 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 est nul 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 (25 % de plus 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).

Un autre essai très instructif sur l'influence du travail du sol a été réalisé par le CIRAD 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 (0) (tableau 21).

On constate que le travail du sol (profond ou même superficiel) a amélioré l'infiltration : **le ruissellement est toujours le plus fort sur 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. **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 considère les interactions sur l'érosion de la préparation du sol et du développement végétal ? Rappelons d'abord les résultats et les mesures d'érosion et du ruissellement sous ananas en fonction des techniques culturales à Adiopodoumé sur des pentes de 4 - 7 et 20 % (tableau 11). 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. Du point de vue de l'érosion, on a observé des pertes de 200 t/ha/an sur sol nu, 25 t/ha/an sur résidus brûlés, 12 t/ha/an sur résidus enfouis et 0,4 t/ha/an seulement, lorsque les résidus sont laissés à la surface du sol. On constate donc que **le labour associé à une 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 une couverture par les résidus de culture, réduit le ruissellement et l'érosion à une part négligeable**.

Au Nigeria (station IITA de Ibadan), Lal (1975) considère que les risques d'érosion sur sol nu après 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 : les rendements ne sont pas toujours 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 (1971) 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).

A Bidi, Serpantié et Lamachère (1991) ont montré que 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.

Des essais de simulations de pluies ont été réalisés, autour du lac de Bam (Burkina Faso) pour comparer un sol battant, à un labour grossier, recouvert ou non de pailis et à un billonnage cloisonné. La figure 29 rapporte des observations effectuées sous pluies simulées de 62 mm/h pendant deux heures sur des sols ferrugineux de la zone tropicale sèche au nord de Ouagadougou. Les mesures confirment :

- la mauvaise infiltration des orages de fin de saison sèche tombant sur un sol encroûté,
- une infiltration réduite à 36 mm,
- le rôle intéressant mais temporaire du labour qui retarde le ruissellement et permet une infiltration de 82 mm,
- le rôle très positif du travail du sol suivi d'un paillage permettant une infiltration de 104 mm,
- 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 (Collinet, Lafforgue, 1979).

FIGURE 29

Evolution du ruissellement en fonction de l'état de surface du sol et des techniques culturales sous une averse simulée de 62 mm/h pendant 2 heures (d'après Roose et Collinet, 1976)

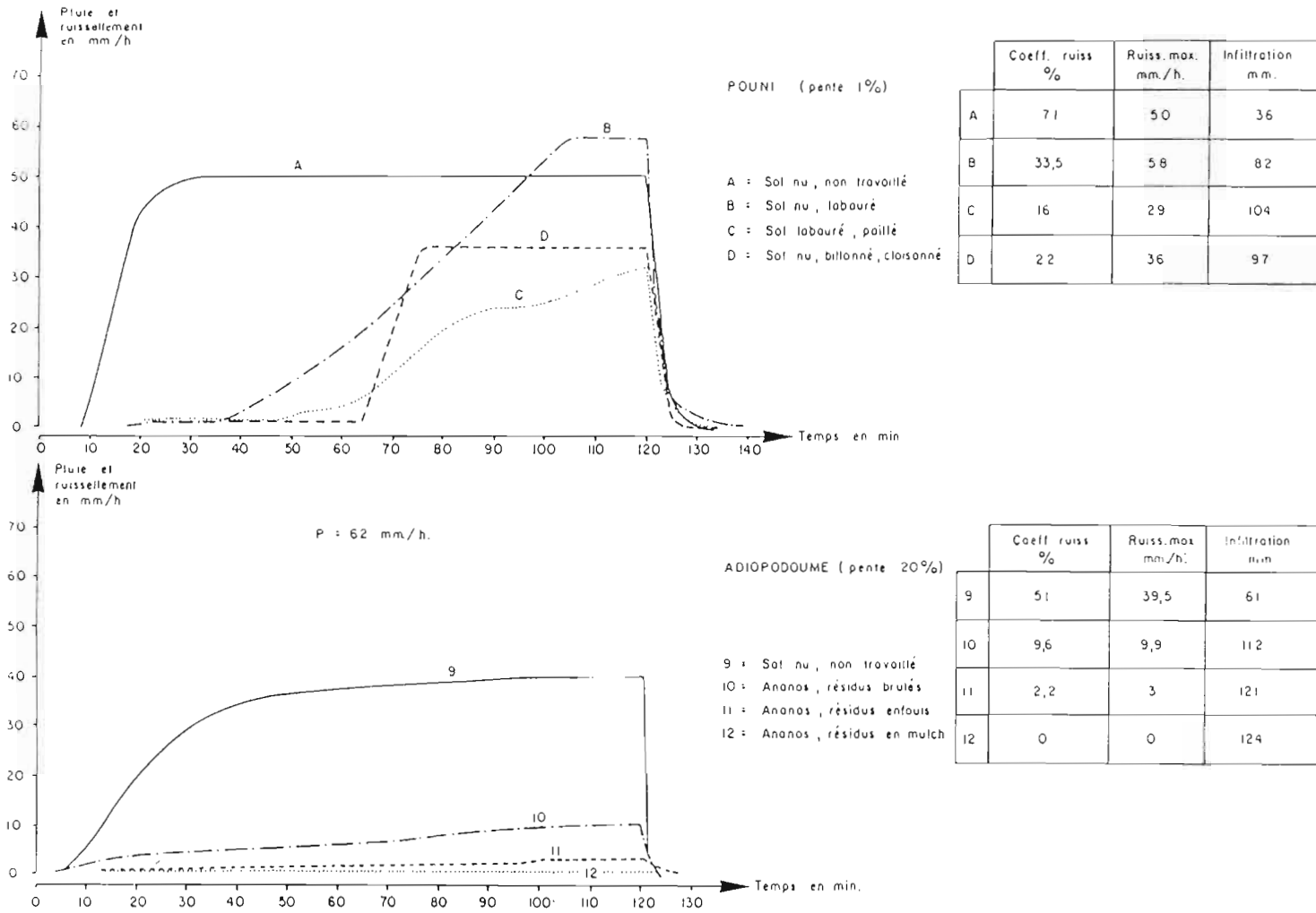


TABLEAU 22

Influence du nombre et du type de préparation du lit de semence sur un sol brun, limoneux battant, lessivé à Campagne/Hesdin, France (d'après Derancourt, 1982; Masson et Roose, 1983)

Traitements	Labour + semis	Labour + hersage couplé semis	Labour + hersage rapide 8 km/h	Labour + vibroculteur + cultivateur + semis	Labour + 2 x vibro + 1 cultivateur + semis
Nombre de passages	2	2	2 + rapide	3 + profond	4 très fin
Nombre de graines germées par m ²	127	114	109	73	59
Ruissellement KR %	5	28	38	57	66

Notes :

- La pluie simulée est de 33 mm en 1 heure : fréquence = 1 fois en 4 ans.
- La différence de rendement est de 10 quintaux/ha en faveur des parcelles les moins travaillées.
- C'est un excellent exemple de GCES où le paysan constate que pour réduire les risques de ruissellement (et d'érosion) et augmenter sa production, il lui faut réduire les investissements en intrants : moins d'heures de travail, moins d'usure du tracteur, moins d'énergie. Dans ce cas, il n'est pas besoin de services de vulgarisation agressifs pour lui faire comprendre que son intérêt va dans le même sens que la protection de l'environnement (réduire les inondations et le ravinement à l'aval).

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 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 soussoilage 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 culture du maïs avec un travail minimum du sol, l'agrégation du sol et l'infiltration (gain : 24 %) ont augmenté 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 (Masson, 1971 ; Shanhold et Lilliard, 1969).

Dans le nord de la France (tableau 22 et 23), Derancourt et Masson ont testé dans le champ d'un paysan l'effet de l'affinage du lit de semence sur la levée des graines de blé, sur

TABLEAU 23

Influence du système de culture sur la dégradation des sols et le ruissellement lors d'une averse de 33 mm en une heure durant l'hiver (d'après Roose, Masson et Derancourt, 1983)

Traitements	Traction aux chevaux blé d'hiver	Prairie	Prairie rompue	Labour + sous solage	Labour pas de sous solage	Engins lourds après la récolte	
						endives	pommes de terre
Profondeur de labour	17 cm	-	25 cm	25 cm	25 cm	30 cm	30 cm
Semelle de labour	0	0	+	+ discontinue	++	+++	+++
Etat de surface	motteux	compact sur 15 cm	petites mottes	petites mottes	petites mottes	encroûté	encroûté
Couvert végétal %	80 %	100 %	7 %	10 % paille	10 % paille	11 % résidus	11 % résidus
Ruissellement Temps avant le ruissellement	69'	16'	15'	15'	4'	1'	2'
En mm	0 mm	2 mm	9 mm	5 mm	14 mm	23 mm	28 mm
En %	0 %	6 %	27 %	15 %	42 %	85 %	85 %
Ruis. final en % après 60 minutes	0 % *	24 %	48 % **	30 %**	73 %	91 %	98 %

* Le ruissellement n'avait pas encore commencé après 60 minutes.

** Le ruissellement n'est pas stable après 1 heure de pluie. Les pluies de 33 mm/h sont simulées sur un sol brun acide sur un plateau couvert de loess. La pente ne dépasse pas 5 % ; coefficient de ruissellement = lame ruisselée/hauteur pluie en %.

le ruissellement et sur les rendements, ceci sur un sol brun lessivé, limoneux et battant. Lorsque le nombre de passages de la herse passe de 2 à 4 et que l'on accélère la vitesse 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 on améliore la capacité de production du terrain, l'infiltration et les revenus nets, tout en diminuant les risques d'érosion et de pollution de l'environnement (Masson et Roose, 1983).

Cette enquête montre la grande diversité des risques de ruissellement (et donc d'érosion) sur les sols limoneux battants soumis à différents systèmes de culture.

La traction bovine entraîne des risques beaucoup plus faibles que la traction motorisée (0 à 73 %). La prairie temporaire protège temporairement le sol, mais dès qu'elle est rompue, son effet diminue rapidement (KR = 24 -> 48 -> 73 %). Le sous-solage peut

TABLEAU 24

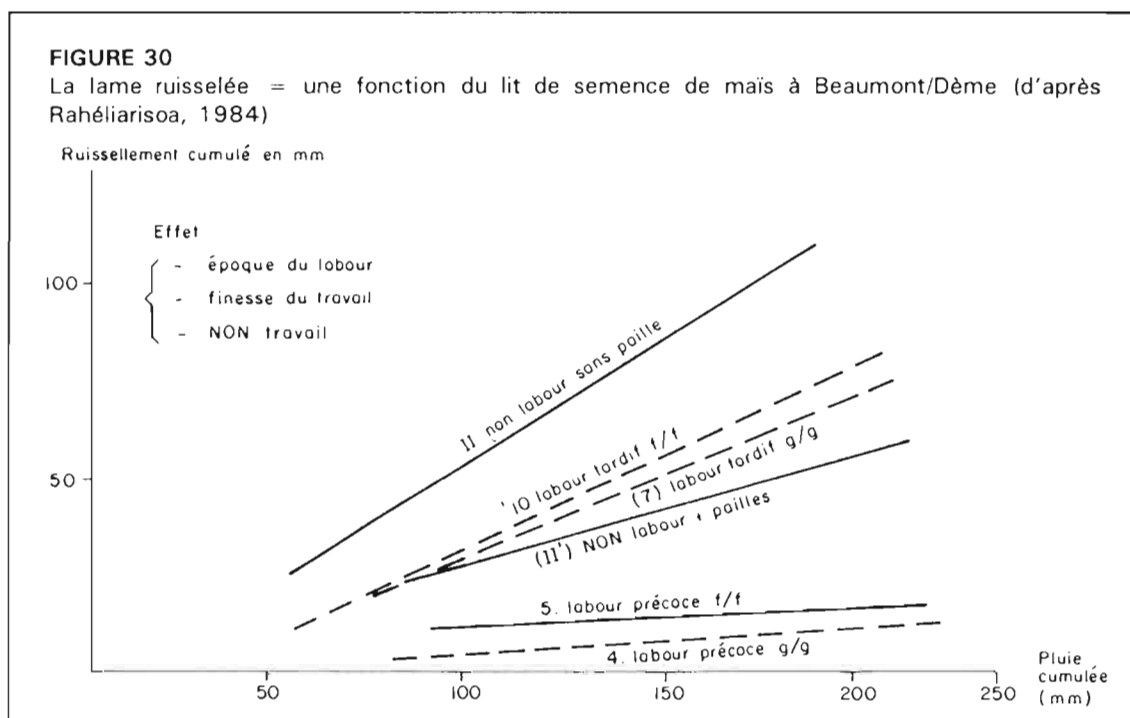
Effet des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion (provoqués par des averses de 40 mm en 1 heure simulées sur des lits de semence de maïs sur terrefort d'un coteau du Lauragais. Résultats extraits des campagnes 1985/6/7 à Narbons (France) (d'après Roose et Cavalié, 1988)

Traitement	Pente %	Ruiss. KR 40 %	Pi mm	FN mm/heure	C moyen g/l	Erosion g/m ²	Répétition 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)	11	58	2
	14-20	17	16	8	9	65	4
	14-20	35	8	12	18	250	8
Id. + compaction 1 fois Id. + compaction 2 fois traces de roues	14-20	28	13	8	12	105	8
	14-20	70	<u>3</u>	<u>4</u>	4	103	4
	16	83	<u>4</u>	1	--	--	1
labour + reprise à l'automne C. Vég. = 30 %	22-29	32	6	13	9	98	4
décompactage + résidus - déchaumage en automne C. Vég. = 40 %	22-29	17	4	21	5	35	5
décompactage + résidus en surface + fraissage 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 pour une averse de 40 mm
 N = Nombre de répétitions
4 = Nettement différent du traitement de référence

localement apporter une aide partielle (KR = 30 <-> 73 %), mais les risques les plus élevés ont été observés après la récolte des endives et des pommes de terre (labour profond) avec des engins lourds. Sur ces sols tassés par les passages répétés des tracteurs et des remorques, le ruissellement atteint rapidement 90 % des pluies.

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 coteau du Lauragais dans le sud ouest de la France, près de Toulouse (Roose, Cavalié, 1988) (tableau 24). 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 % ; 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 fraisage 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 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 (Rahéliarisoa, 1984 ; Lelong, Roose, Darthoux, 1992).

Six traitements permettaient de rechercher les effets de l'époque du labour, de la finesse du travail de préparation du lit de semence et des résidus de culture en cas de non travail du

sol (figure 30). On constate d'abord que le non travail d'un sol nu donne le plus de risques de ruissellement. Par contre, si 50 % de la surface du sol reste 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 accentue 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 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 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, l'enfouissement partiel des pailles (stubble mulching) et le non labour laissant les résidus de culture en surface (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 (les herbicides sont chers), machines pour éclater le sol sans le retourner (dents vibrantes au lieu de charrue), machines pour semer à travers les pailles, et problèmes phytosanitaires (en particulier, sautériaux et escargots).

Au Brésil, Leprun *et al.*, (1986) ont fait une synthèse des expérimentations en parcelles d'érosion dans les régions Nord-Est, Centre-Ouest et Sud (tableau 25). Les résultats démontrent la remarquable efficacité des pratiques culturales et biologiques simples, facilement applicables par les agriculteurs, peu onéreuses et qui maintiennent durablement la productivité. Dans les meilleures situations, ces pratiques biologiques permettent le contrôle de l'érosion et la diminution sensible du ruissellement.

Les techniques culturales mécanisées les plus efficaces sont le travail minimum, le semis direct dans la litière constituée des résidus de la culture précédente, ou encore, la culture en courbe de niveau. Les meilleures pratiques biologiques sont les rotations culturales, la culture sur une litière de résidus de culture ou d'engrais verts et les bandes d'arrêt enherbées permanentes en courbes de niveau.

Séguy, Bouzinac *et al.* (1989), constatant la difficulté de maintenir l'infiltration dans les grandes cultures mécanisées et de réduire l'érosion par les structures antiérosives en courbe de niveau (Murundum au Brésil, levée de Monjauze en Algérie) ont mis au point, avec les coopératives, tout un système de culture réduisant au minimum le travail du sol et comportant la sélection de graines résistantes aux maladies, la mise au point de matériels de semis direct plus fertilisation dans les litières de résidus de culture (de la canne planteuse manuelle aux semoirs mécanisés), le semis de légumineuses en dérobée sous le maïs, la fertilisation adaptée

TABLEAU 25

Efficacité des systèmes de culture (C) et des pratiques antiérosives (P) étudiées au Brésil

(d'après Leprun *et al.*, 1986)

	P	C
Coton isohypse (labour + 2 sarclages conventionnels)	0,41	
+ maïs + haricot isohypse	0,75	
+ maïs + haricot isohypse + bandes d'arrêt	0,48	
Maïs isohypse (labour + 2 sarclages)	0,87	
+ binage alterné	0,16	
+ binage alterné + cordons végétations permanente	0,08	
Tomate + rotation bi-annuelle haricot		0,56
+ préparation du sol		0,08
+ rotation avec légumineuse en mulch		0,11
+ rotation avec jachère enfouie		0,38
+ rotation jachère deux ans en mulch		0,01
+ maïs + engrais vert en mulch		0,07
+ rotation engrais vert + cordons herbes	0,04	
Soja sans préparation de sol		0,67
Blé-soja + préparation minimum		0,37
Blé-soja sans préparation ou tillage		0,17
Blé-soja sans préparation ou tillage + mulch		0,09
Orge-soja + avoine sans préparation du sol		0,46
Blé-maïs sans travail		0,14
Blé-maïs + engrais		0,31

TABLEAU 26

Erosion, ruissellement et rendements en fonction des techniques de préparation du sol (station de Saria près de Koudougou, Burkina Faso : sol ferrugineux 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		
			E (t/ha)	E (t/ha)	KR %	RDT (t/ha)	E (t/ha)	KR %	RDT (t/ha)	E (t/ha)	KR %
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		0,99	13,6		2,04	7,4		2,30

au niveau de production, une gamme d'herbicides et de pesticides compatibles avec la culture sur litière et un réseau de recherche et de commercialisation.

L'ensemble de ces méthodes sont actuellement testées au Cameroun par les chercheurs de l'IRA et du CIRAD dans le cadre d'une agriculture intensive du coton et des céréales en condition soudano sahélienne sur des sols sableux ferrugineux tropicaux connus pour leur fragilité.

LE 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 (sud-ouest de la France). 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 23).

A Bouaké (tableau 21), on a observé que le **pulvérisage** superficiel du sol nu limite peu le ruissellement par rapport au témoin non travaillé et **augmente sérieusement l'érosion** (Kalms, 1975).

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 (tableau 26). 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 en traction attelé 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 améliorer l'infiltration en zone semi-aride 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.

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

TABLEAU 27

Effet d'un buttage sur un sol presque nu (pente de 7 % ; Adiopodoumé, 1956) (d'après Roose, 1973)

Mai à août : pluies = 1534 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

TABLEAU 28

Effets d'un billonnage cloisonné isohypse sur un sol sableux de Basse Côte d'Ivoire sous culture d'ananas (d'après Roose, 1973)

1956 à 1958		E t/ha	KR moyen %	KR max %
Ananas à plat planté en courbe de niveau	1er an	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

(donc en principe diminuent le ruissellement), **elles augmentent aussi la pente moyenne du terrain**, diminuent la 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 (tableau 27) (Roose, 1973-77).

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 glaciis 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 à 1 000 kg/ha/an pour 27 H_e x Jours de travail supplémentaire = 220 FF). Les essais entrepris par le CTFT à Gampela (Roose et Piot, 1984) **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**

sont si basses que le complément d'infiltration ne profite que rarement au rendement des cultures. Rappelons les essais effectués au simulateur de pluie dans la région du lac Bam par Collinet et Lafforgue (figure 29). 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 (tableau 28), (Roose, 1973-77).

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 (1986) 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 la gestion des résidus de culture. Rappelons les résultats obtenus lorsque les résidus d'ananas sont brûlés et enfouis, l'érosion et le ruissellement augmentent beaucoup plus rapidement que lorsque les résidus sont enfouis (tableau 11). 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 (Roose, 1980). 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 maximum 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 (Fotsing, 1992) (figure 31). 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 25 %, 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**

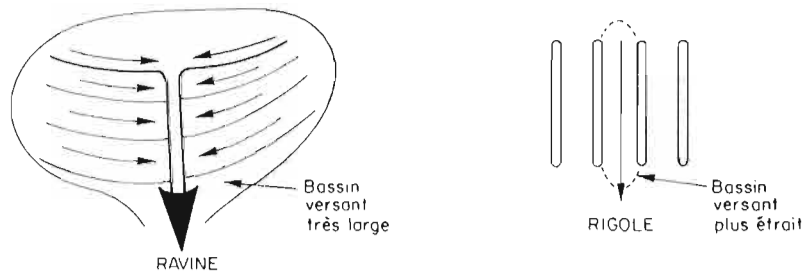
FIGURE 31

Orientation du billonnage en fonction de la pente du terrain

Sur pente faible ... :	• billonnage cloisonné	P = 0,1
	• billonnage isohypse, pente jusqu'à 2 %	0,2
	8 %	0,3
	16 %	0,4
	25 %	0,6

Sur pente forte > 25 %, l'effet de la rugosité sur le ruissellement diminue rapidement, car la capacité de stockage en eau diminue, par contre, les risques de débordement et de glissement augmentent

- lors des pluies faibles, l'érosion est plus faible si billonnage isohypse
- lors des pluies fortes, le ruissellement risque de déborder, de créer une brèche par où vont s'écouler toutes les eaux retenues derrière les billons, brèche qui va se transformer en ravine, plus difficile à effacer que les multiples petites rigoles qui drainent les billons orientés dans le sens de la pente (bassin drainant plus petit).

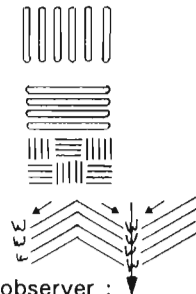


□ Au PEROU, à des altitudes de 1500 à 4000 m, les paysans tentent d'adapter les façons culturales aux conditions climatiques locales saisonnières :

- si la saison est :

- tardive, le billonnage est partiel
- très humide, les billons seront construits parallèles à la pente
- très sèche ou tardive, ----- perpendiculaires à la pente
- incertaine, ----- en patchwork

- si la pente est très forte et les sols pauvres, - en chevrons



□ Au CAMEROUN, en Pays Bamiléké vers 1000 à 2000 m d'altitude, on peut observer :

- sur pente faible, de gros billons en courbe de niveau
- sur pente forte, de gros billons courts dans le sens de la pente, en quinconce



(leur efficacité dépend du couvert végétal développé par les cultures associées)

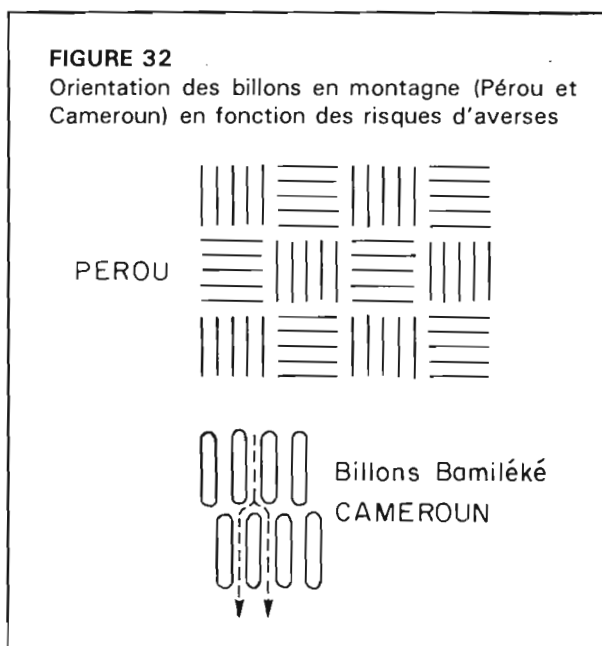
EN CONCLUSION, il est délicat de conseiller l'orientation des billons !

Sur pentes faibles, le billonnage ou le buttage cloisonné est très efficace,

Sur pentes fortes, en fonction des risques majeurs, on peut choisir:

- | | |
|----------------------------|---|
| si nécessité de drainer : | des billons obliques drainant vers un exutoire enherbé |
| : | des gros billons courts en quinconce bien couverts |
| si risques de glissement : | des micro-terrasses en escalier ou des billons obliques |

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 (moins de 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 tout au long de l'année (voir troisième partie).



En montagne, le travail du sol présente de sérieux dangers :

- il améliore temporairement l'infiltration, mais réduit la cohésion du matériau et, de ce fait, accroît les risques d'érosion et de glissement ;
- il permet d'enfouir les matières organiques, mais expose les horizons profonds moins humifères à la battance des pluies ;
- surtout, il accélère le creeping sec en déplaçant les mottes par les outils.

Les solutions suivantes ont été proposées :

- le labour grossier en grosses mottes retournées par deux à quatre ouvriers travaillant ensemble, pour enfouir les herbes et le fumier ;
- le buttage est dangereux car il concentre le ruissellement en filets d'eau qui ont tôt fait de creuser des rigoles sur fortes pentes ;
- le billonnage est souvent utilisé pour enfouir la jachère et les résidus de culture :
 - il accumule beaucoup de terre friable bien drainée pour les tubercules,
 - il stocke l'eau (60 à 20 mm si la pente augmente de 2 à 40 %) s'il est perpendiculaire à la pente (risque de glissement lors des plus fortes averses),
 - il draine les pentes s'il est oblique ou dans le sens de la pente,
 - il donne aux cultures une avance pour dominer les mauvaises herbes.

Au Pérou, les paysans choisissent, en fonction des temps de travaux, le labour en plein, le billonnage avant semis, le billonnage à fort écartement après semis ou le labour par tracteurs (figure 32). On constate que l'on peut augmenter les rendements tout en réduisant les temps de travaux — et par conséquent, les bénéfices des paysans — en travaillant le sol

TABLEAU 29

Facteur couvert végétal et techniques culturales (C) pour diverses cultures en Afrique occidentale (d'après Roose, 1977)

	C annuel moyen	
	mini	maxi
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	0,8
Plante de couverture à développement rapide ou plantation hâtive, première année	0,01	0,1
Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, deuxième année	0,01	0,1
Maïs, mil, sorgho (en fonction de rendements)	0,4	0,9
Riz de plateau en culture intensive	0,1	0,2
Coton, tabac en deuxième cycle	0,5	0,7
Arachide (en fonction du rendement et de la date de plantation)	0,4	0,8
Niebe rampant		0,3
Manioc, première année et igname (en fonction de la date de plantation)	0,2	0,8
Palmier, hévéa, café, cacao avec plantes de couverture	0,001	0,3
Ananas à plat (en fonction de la pente) plantation hâtive	0,001	0,3
- avec résidus brûlés	0,2	0,5
- avec résidus enfouis	0,2	0,3
- avec résidus en surface	0,001	0,01
Ananas sur billons cloisonnés (pente 7 %), plantation tardive		0,1

TABLEAU 30

Facteur couvert végétal (C) en Tunisie (d'après Cormary, Masson, 1964)

	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

au tracteur ; mais bien entendu, on augmente beaucoup les risques de dégradation du milieu car les travaux se font obligatoirement dans le sens de la plus grande pente, sans quoi le tracteur verserait.

De plus, en année sèche, les paysans orientent leurs billons perpendiculairement à la pente pour stocker le plus d'eau possible. Si par contre, l'année s'annonce très humide, ils tracent les billons dans le sens de la plus grande pente pour favoriser le drainage. Enfin, si l'année s'avère incertaine, ils font un carré orienté perpendiculairement à la pente et le suivant dans le sens de la pente : ce patchwork de petites parcelles permet au ruissellement de circuler lentement.

CONCLUSIONS SUR LE COUVERT VEGETAL ET LES TECHNIQUES CULTURALES POUR DIFFERENTES REGIONS

Quelles que soient la pente, les techniques culturales et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet (peu importe son architecture et sa composition 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 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 et l'érodibilité du sol ; cependant, 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 adaptées 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 ou non travail du sol) pour limiter la destruction de la macrostructure du sol.

En région tropicale sèche (Charreau, Nicou, 1971), 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 paillage, à partir des déchets de culture pourrait résoudre de façon élégante les problèmes d'érosion, mais une 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 Etats-Unis (Segui, Bouzinac *et al.*, 1989).

Le facteur C (influence du couvert végétal et des 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 aux Etats-Unis 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) (tableau 29) et en Tunisie (tableau 30).

Le facteur C du modèle USLE 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 d'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.

LES STRATEGIES DE LUTTE ANTIEROSIVE

La lutte antiérosive classique consiste généralement à appliquer des recettes : structures antiérosives et techniques culturales qui ont montré quelque part et en d'autres circonstances, 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 (Hudson, 1991).

En ce qui nous concerne, nous passerons en revue et analyserons l'efficacité de pratiques antiérosives, des structures de gestion de eaux de surface et les problèmes posés par certains systèmes de production, et enfin, nous tenterons de montrer comment utiliser pratiquement le modèle empirique de Wischmeier (Roose, 1977, 1987 et 1992).

Nous avons vu au début de cet ouvrage, comment l'Etat a été amené à aborder les problèmes de lutte antiérosive d'un point de vue aval ou **du point de vue de l'intérêt général des citoyens** qui tendent à protéger la qualité des eaux (stratégies d'équipement rural). Mais ici, nous aborderons ces problèmes de lutte antiérosive **du point de vue amont**, en vue de répondre aux problèmes de dégradation des terres des paysans : nous parlerons de stratégies de développement agricole.

LES STRATEGIES D'EQUIPEMENT

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 :

- 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. Ces terres 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.

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.

- 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 % (Pathak *et al.*, 1985) ;
- 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, pour les vergers.

- 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 autosuffisance 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.

TABLEAU 31

Techniques culturales et structures antiérosives en fonction du mode de gestion des eaux de surface (d'après Roose, Ndayizigiyé et Sekayange, 1992)

Modes de gestion de l'eau	Structures	Techniques culturales
AGRICULTURE SOUS IMPLUVIUM Zone aride à semi-aride	Impluvium, citerne Drain, digues sur les oueds Terrasses discontinues	Labour, cuvettes Microbassins localisés Zaï
INFILTRATION TOTALE Zone semi-aride (P < 400 mm) ou zone humide sur sol très perméable	Fossés aveugles Terrasses radicales Gradins	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'ÉNERGIE DU RUISSELLEMENT Tous climats, sols semi-perméables. Pentas pas trop raides	Cordons ou murs de pierres Talus enherbés, lignes d'herbes Haies vives	Agroforestrie Labour motteux Cultures alternées/prairie Paillis

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.

LES STRATEGIES DE DEVELOPPEMENT AGRICOLE

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 et de dialogue avec la population** au cours de laquelle il procédera, avec des paysans, à des enquêtes pour appréhender le système agraire, définir les systèmes de production traditionnels, préciser les lieux, époques, et la façon dont se posent 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'informerá 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 productivité 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, le plus précisément possible, 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.**

- **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.

L'étude de ces aménagements de terroir demandera nécessairement une approche plus poussée des aspects socio-économiques, 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 et de la fertilité, on pourra choisir des méthodes mieux adaptées d'une part aux conditions écologiques de la région et d'autre part, au contexte socio-économique des populations locales.

La GCES s'appuie sur la gestion raisonnée de l'eau et des nutriments. La gestion des nutriments DOIT associer la fumure (organique et minérale) à la lutte antiérosive. La gestion de l'eau doit aboutir à utiliser les eaux disponibles en vue de maximaliser la productivité des terres.

Si on trace une diagonale 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 techniques culturales et des structures antiérosives particulières.

LES PRATIQUES ANTIEROSIVES

Il s'agit de techniques culturales mises en oeuvre exclusivement pour réduire le ruissellement et les dégâts d'érosion (tableau 31 et 33).

LA CULTURE EN COURBE 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 : le facteur P atteint 0,5 entre 1 et 8 % de pente, P = 0,6 entre 8 et 12 % de pente, 0,8 entre 17-20 % et tend vers 1 au cas où les pentes sont supérieures à 25 % (Wischmeier et Smith, 1978). 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.

LE BILLONNAGE EN COURBE DE NIVEAU (CONTOUR RIDGING)

Nous avons vu que le labour suivi d'un billonnage pouvait augmenter les risques d'érosion par le 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 courbe de niveau est deux fois plus efficace que le simple labour en courbe de niveau, 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, on risque la rupture des billons provoquant de graves ravinements ou encore des glissements de terrain. 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 (expérimentations de Hudson au Zimbabwe). Une autre solution consiste à cloisonner les billons (contour tied ridging). 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 les 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.

Les Bamileke, sur les sols volcaniques du Cameroun, ont développé un système astucieux de gros billons en chicane, orientés dans le sens de la pente et couverts toute l'année par des cultures associées. La force érosive des eaux de ruissellement s'en trouve réduite (Fotsing, 1992). 573).

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 qui existent** entre la pente, les systèmes culturels 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 culture.

LA CULTURE EN BANDES EN COURBE DE NIVEAU, ISOLEES PAR DES BANDES D'ARRET ENHERBEES (BUFFER STRIPCROPPING)

Pour des pentes inférieures à 8 % l'érosion est ainsi réduite à 30 % de celle du témoin ($P = 0,3$). 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 et permettent une infiltration croissante du ruissellement. Ce filtre est très efficace lorsque l'on a un mélange de légumineuses et de

graminées et qu'il y a un grand nombre de tiges ou de racines à la surface du sol par mètre carré (Roose, Bertrand en Côte d'Ivoire, 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 m 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 pérennes à enracinement profond, améliore l'infiltration. En milieu tropical, on peut utiliser *Andropogon gayanus*, *Pennisetum purpureum*, *Paspalum notatum*, *Tripsacum laxum* et divers *Stilosanthes* en mélange, cannes à sucre et diverses plantes fourragères. Le *Setaria sphacelata* donne de bons résultats les deux premières années, mais s'épuise rapidement sur les sols pauvres acides.

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) et surtout par voie de rejets ou de stolons (*Cynodon dactylon*). Des plantes qui présentent un feutrage de racines et de tiges nombreuses freineront mieux le ruissellement que des arbres isolés.

Différents VETIVER ont été chaudement recommandés par certains praticiens car ils résistent bien en région semi-aride où le surpâturage est fréquent. Il produit un paillage siliceux qui persiste longtemps, mais présente de mauvaises qualités fourragères. Le malheur, c'est que pour tirer l'essence qu'on extrait de ses racines, il faut détruire l'aménagement. Chaque fois que c'est possible, il vaut donc mieux lui préférer des herbes fourragères bien adaptées aux conditions locales.

La bande d'arrêt se comporte comme une éponge qui absorbe partiellement les eaux de ruissellement et comme un peigne qui ralentit le ruissellement et provoque le dépôt des terres provenant du champ cultivé en amont. Les eaux de ruissellement s'infiltrent en profondeur ou sont freinées ; la baisse de leur capacité de transport provoque alors le dépôt des éléments érodés les plus grossiers. D'où le maintien d'une bonne porosité et la formation d'une petite terrasse (5 à 20 cm par an) qui, à la longue transforme les paysages en une succession de champs en pentes douces et de talus protégés par la végétation herbacée.

Cette méthode peu coûteuse a été testée avec succès en vraie grandeur en station de recherche, en culture industrielle (hévéa et ananas) et en culture villageoise modernisée ; elle présente de sérieux avantages :

- implantation facile et peu onéreuse par les paysans intéressés,
- traitement rapide de grandes surfaces sans intervention d'équipes topographiques trop lourdes et trop chères : après une journée de formation à l'usage du niveau à tuyau d'eau, la plupart des paysans sont capables de tracer les courbes de niveaux sur leurs parcelles,
- production fourragère des bandes pouvant servir à nourrir le bétail ou à procurer du paillage pour les champs,
- usage de ce réseau vivant en courbe de niveau pour orienter les 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 (Delwaille, 1973 ; Roose et Bertrand, 1971 ; Roose, Rodriguez, 1990). Dans cette méthode, on combine la culture en courbe de niveau et en bandes isolées par des bandes d'arrêt : on limite donc la longueur de pente et 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 et 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. Ces bandes d'arrêt évoluent spontanément en talus comme des limites parcellaires.

Dans la zone soudano-sahélienne du Sud Mali, le DRSPR a proposé d'intercaler, sur les champs cultivés, des bandes enherbées de trois mètres de large tous les 50 mètres (couvrant 6 % du terrain). Six espèces pérennes ont été comparées en 1987-88 (Hykoop, Poel et Kaya, 1991). *Brachiaria ruzizensis* recouvre rapidement le terrain dès la première année. Mais la seconde année, c'est *Stylosanthes hamata* qui repousse le mieux. *Andropogon gajanus* est très appréciée, mais son installation n'est pas au point. *Macroptilium lathyroides* et *atropurpureum*, *Clitoria ternatea* et *Pennisetum pedicellatum* n'ont pas été retenus. Actuellement, le DRSPR préconise un mélange de *Brachiaria* et de *Stylosanthes*. Certains paysans fanent le *Brachiaria* et le mélangent à la mélasse pour nourrir le bétail.

Au Yatenga (pluies de 400 à 700 mm), situé au nord-est de cette même zone mais au Burkina Faso, Rodriguez a mis au point une méthode de récolte des graines d'*Andropogon* sp. et de *Pennisetum pedicellatum* au mois de décembre par les paysans. En juin, au début de la saison des pluies, les graines sont scarifiées par pilonnage avec du sable humide, puis

humectées durant 12 heures. Elles sont semées sur une bande de 50 cm travaillée superficiellement à l'amont des cordons pierreux ou entre deux traits de charrue tous les 20-25 mètres. Ces haies d'*Andropogon* sont très appréciées des paysans, non seulement parce qu'elles aident à maîtriser les nappes de ruissellement, mais aussi parce qu'elles produisent les longues pailles nécessaires pour les toits et l'artisanat, et un excellent fourrage dont les repousses vertes sont appréciées du bétail en saison sèche. Même si les touffes d'*Andropogon* poussent dans le champ cultivé, elles seront préservées du sarclage (Roose, Rodriguez, 1990).

LE PAILLAGE NATUREL OU ARTIFICIEL

Etant donnée 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 trouver le moyen de couvrir la terre durant la période critique des fortes pluies pour éviter la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol, la formation de croûtes de battance et le démarrage du 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 mètres, même en année très pluvieuse (tableau 13). Le paillage, méthode bien connue des horticulteurs est donc très efficace pour infiltrer les eaux de pluie, réduire le ruissellement et l'évaporation, et protéger le sol contre l'érosion. 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 peu 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 pluies simulées, que le paillage pouvait ralentir la diminution de l'infiltration du sol après culture. Cependant, lorsque les sols sont peu perméables, sableux ou 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 10-15 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 contre l'érosion en saison des pluies 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 la nourriture. Cette méthode est actuellement à l'étude au Rwanda (Ndayizigiye, 1992) 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 semence 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 et l'IRFA, montre bien le rôle des résidus de culture 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 sur sol nu. 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 t/ha. Pour un traitement analogue mais pour lequel les résidus furent enfouis, l'érosion est encore de moitié inférieure (12 t/ha). 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^{ème} du sol nu et moins de 1/60^{ème} 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 courbe de niveau, ce qui faciliterait grandement la mécanisation de l'agriculture (Valentin et Roose, 1982).

Il est bon enfin de rappeler ici que l'enfouissement de matières organiques dans le sol peut améliorer la stabilité de la structure, la résistance à la battance des pluies. D'après le nomographe de Wischmeier, le gain de 1 % de matières organiques dans l'horizon superficiel du sol permet de diminuer de 5 % les pertes en terre par résistance de la structure pour les sols limoneux, et de 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 (il reste moins de 5 % 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 paillage et entraîner une réduction de l'ordre de 60 à 99 % des pertes en terre. Il semble donc que la gestion de la biomasse à la surface du sol, à la fois, réduise de façon considérable les pertes 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, selon les observations sur le terrain, tant en milieu tropical humide (Adiopodoumé) qu'en zone semi-aride (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 PULVERISATION

Les méthodes de paillage et leurs variantes entraînent généralement des contraintes techniques (risques phytosanitaires, risques de maladies par insectes et risques d'envahissement par les mauvaises herbes) ou économiques (collecte du paillage : 250 à 300 jours de travail) 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 (Roose, 1975 et 1977).

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.

Au tableau 32, 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.

TABLEAU 32

Effet d'un mulch plastique sur sol nu et *Panicum*, sur l'érosion (t/ha) et sur le ruissellement (KR %) (d'après Roose, 1975; 1977)

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	1664	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

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 sur ces sols sableux, le traitement au Curasol n'a pas suffi pour réduire l'érosion sur sol nu au-dessous de 10 tonnes de pertes en terre, valeur tolérable sur ce genre de sol. Son prix de revient (4 000 FF/ha en 1973 pour une dose moyenne de 60 g/l/m²) et la 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 4000 FF en 1990. Si on dispose d'un champ de Guatamalagrass (*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), 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.

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 (Séguy *et al.*, 1989), puis au Nigeria (Juo, Jonhson, Lal, station IITA à

TABLEAU 33

Le facteur "pratiques antiérosives P" dans le modèle de prévision de l'érosion en nappe de Wischmeier et Smith

Etats Unis (d'après Wischmeier et Smith, 1978)	longueur max	P	
- Labour isohypse	1 à 8 %	122 à 61 mètres	0,5
	9 à 12 %	36 m	0,6
	13 à 16 %	24 m	0,7
(contouring)	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 à 30 m	0,25 → 0,50
	9 à 16 %	24 m	0,30 → 0,60
	17 à 25 %	15 m	0,40 → 0,90

Afrique de l'ouest (d'après Roose, 1977)	P
- billonnage isohypse cloisonné	0,2 à 0,1
- bandes antiérosives de 2 à 4 m de large	0,3 à 0,1
- mulch de paille de plus de 6 t/ha	0,01
- mulch Curasol à 60 g/l/m ² (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 80 cm de dénivelé plus labour isohypse plus binage plus fertilisation	0,1 à 0,05

Sierra Leone (d'après Millington, 1984)	temps nécessaire pour 100 m	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

Ibadan), l'introduction d'une culture de légumineuses 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 attendant une meilleure luminosité, envoie 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 mésosfaune, 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 les graines. Une rasette 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 l'érosion. Il est possible que l'élimination du ruissellement permette une alimentation hydrique des deux cultures et donc réduise leur concurrence. 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, 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.

LE FACTEUR P DANS L'EQUATION 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, Smith and Umland, 1958 ; Roose et Bertrand, 1971 ; Roose, 1973 ; Delwaulle, 1973 ; Masson, 1980 ; Millington, 1984).

Les techniques antiérosives de terrassement pour la diversion ou pour l'absorption totale des eaux ne figurent pas dans le tableau 33, 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).

Le tableau 33 montre de façon claire 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.

LES STRUCTURES ANTIEROSIVES EN RELATION AVEC LES MODES DE GESTION DE L'EAU [planches photographiques 26 et 27]

Il arrive forcément des averses pour lesquelles le sol ne peut absorber toute l'eau : ceci est capital en zone aride et semi-aride car on va pouvoir collecter cette eau et améliorer localement la production. 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 dissipation de l'énergie du ruissellement (runoff spreading).

LES STRUCTURES DE CAPTAGE DU RUISELLEMENT 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, compléter les apports pluviométriques et améliorer la sécurité de production des cultures (Hudson, 1990).

Reij, Muler et Begeman (1988), dans leur ouvrage sur la capture des eaux de ruissellement en vue d'améliorer la production végétale, classent les techniques disponibles de la façon suivante :

- collecte des eaux sur une courte distance : microcatchment, demi-lune ;
- collecte des eaux au bas d'une longue pente : digues de terre, boulis, "trapezoidal bunds" au Turkana (Kenya) ;
- collecte des eaux de rivière dans son lit ;
- diversion des écoulements d'oued ;
- barrage avec culture du réservoir après infiltration.

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

Il distingue en amont des bassins, les "**tabias**", bourrelets 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) (figures 33 et 34).

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 (figures 35 et 36).

El Amami (1983), a pour sa part, classé les systèmes d'aménagements hydrauliques traditionnels en fonction des climats (figure 36).

Dans la zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale, la plupart des sols sont encroûtés en surface et donnent lieu à un ruissellement superficiel particulièrement dommageable 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 parcours fonctionne comme un impluvium produisant un ruissellement abondant.

Le zaï

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 dont le zaï forestier, particulièrement bien adapté pour introduire l'agroforesterie en zone soudano-sahélienne (figure 5).

Les demi-lunes (figure 37)

Sur les glacis limoneux qui se dégradent très vite, une fois la végétation naturelle disparue, 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 (Niger), la demi-lune creusée de 20 cm a une surface cultivée de 6 m² pour une

FIGURE 33
Tabias et déversoirs

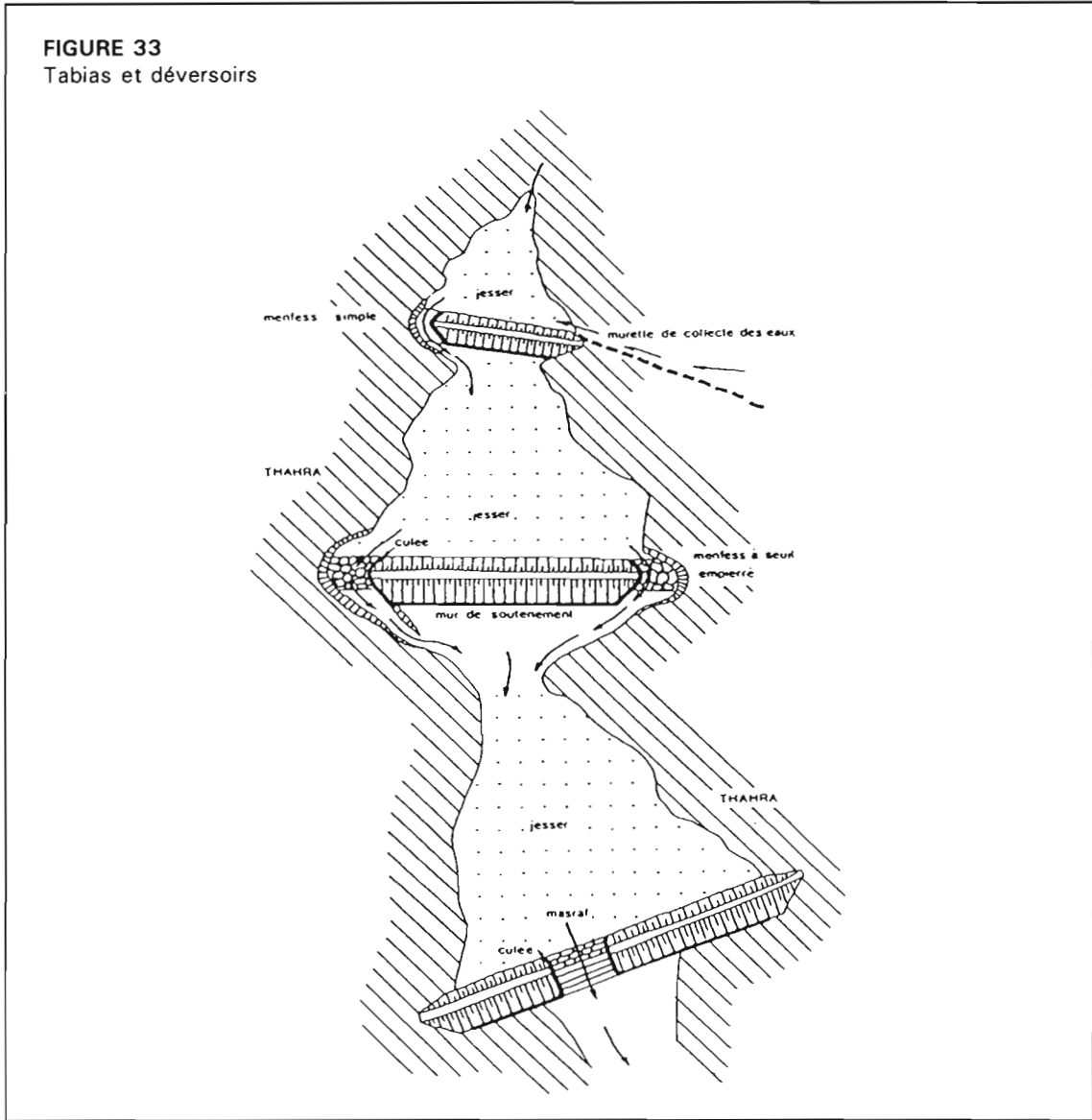
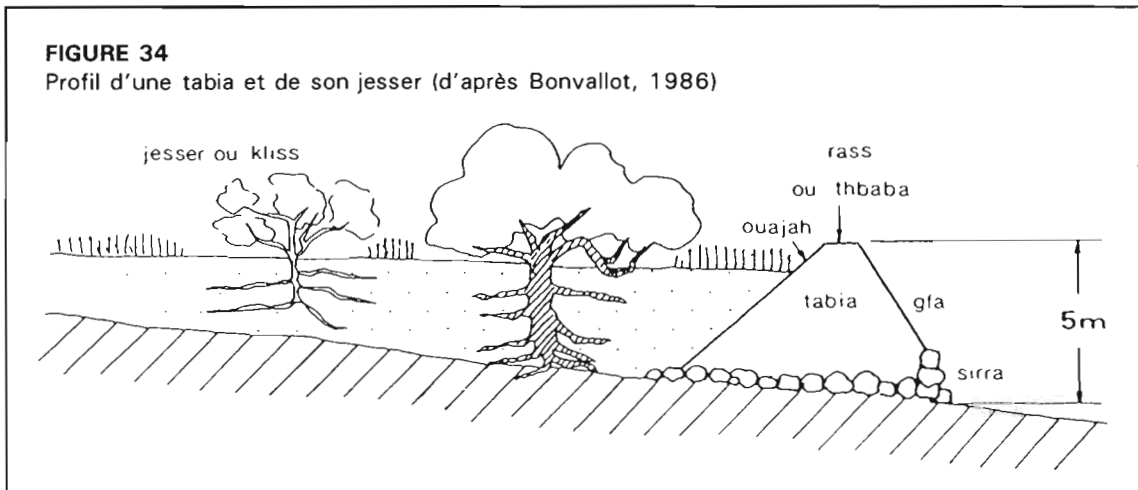
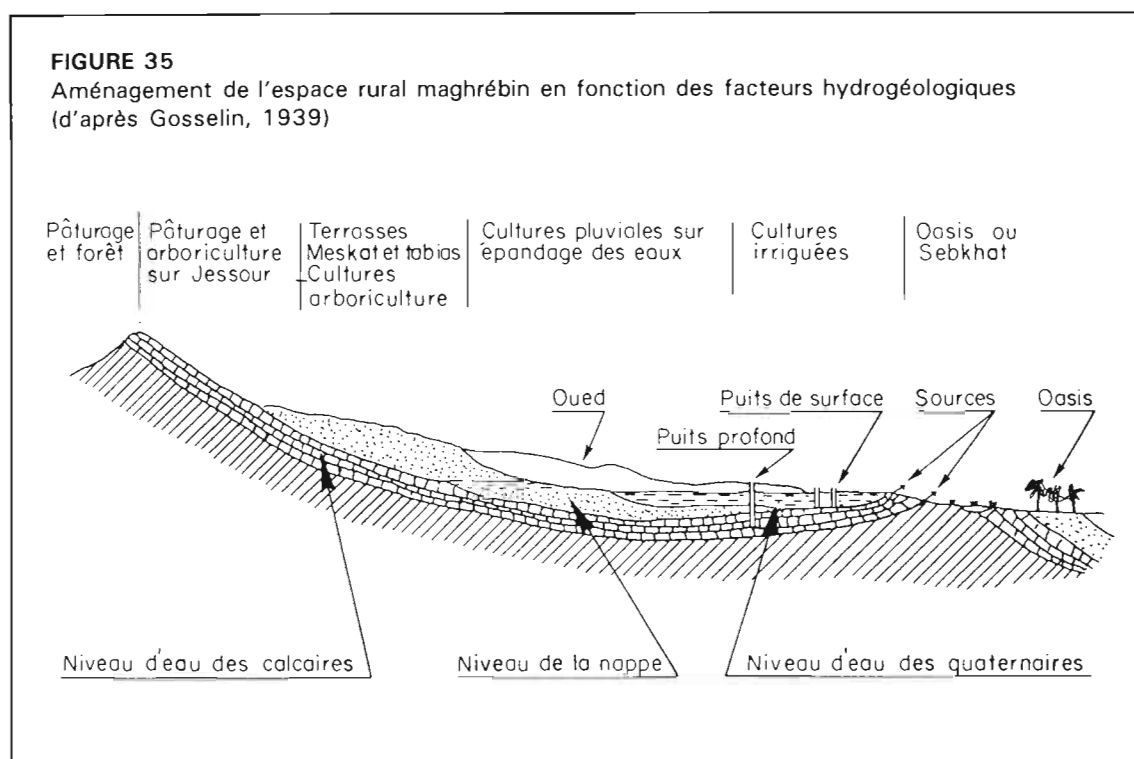


FIGURE 34
Profil d'une tabia et de son jesser (d'après Bonvallot, 1986)





surface de réception de 16 m^2 (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 $900 \text{ FF} = 80 \text{ h/j/ha}$). On peut aussi creuser des cuvettes de $3 \times 0,6 \times 0,6$ (1 m^3) drainant 10 m^2 , au fond desquelles on plante un ou deux arbres (projet FAO 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. L'apport de paille ou de branches permettrait de capter du sable éolien pour maintenir une bonne infiltration. L'apport localisé de fumier pourrait aussi aider à maintenir la capacité d'infiltration.

Les citernes ou boulis (figures 37, 38 et 41)

Les citernes ou boulis sont 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, ont construit une digue en forme de croissant s'étirant sur une centaine de mètres. Dès les premières pluies, ils disposent de 100 à 500 m^3 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 : maïs précoce de soudure et 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 se déplacer jusqu'au point d'eau dans la vallée. Cet aménagement qui améliore surtout la sécurité alimentaire 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

FIGURE 36
 Classification des systèmes hydrauliques traditionnels en fonction des climats
 (d'après El Amami, 1983)

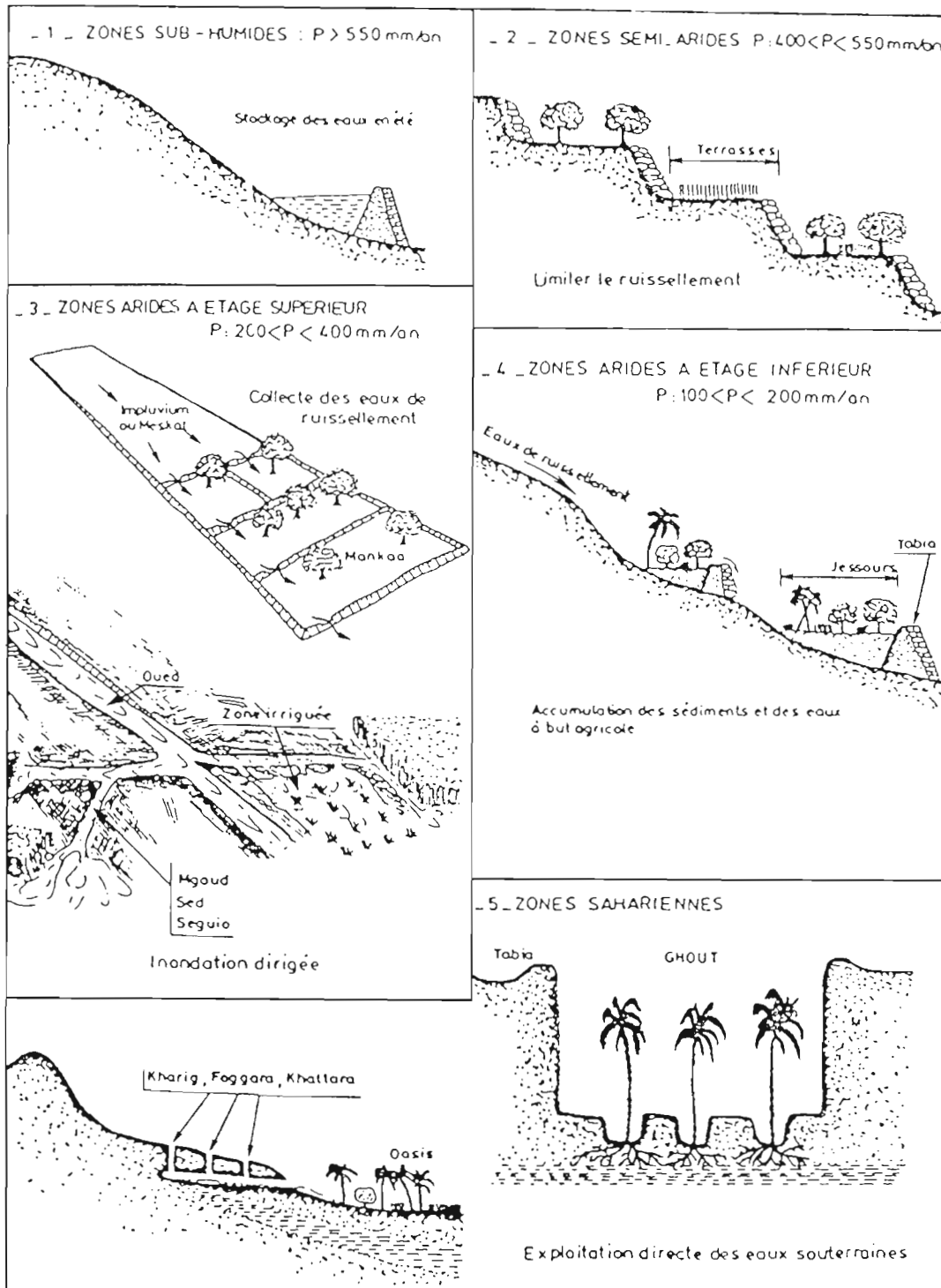
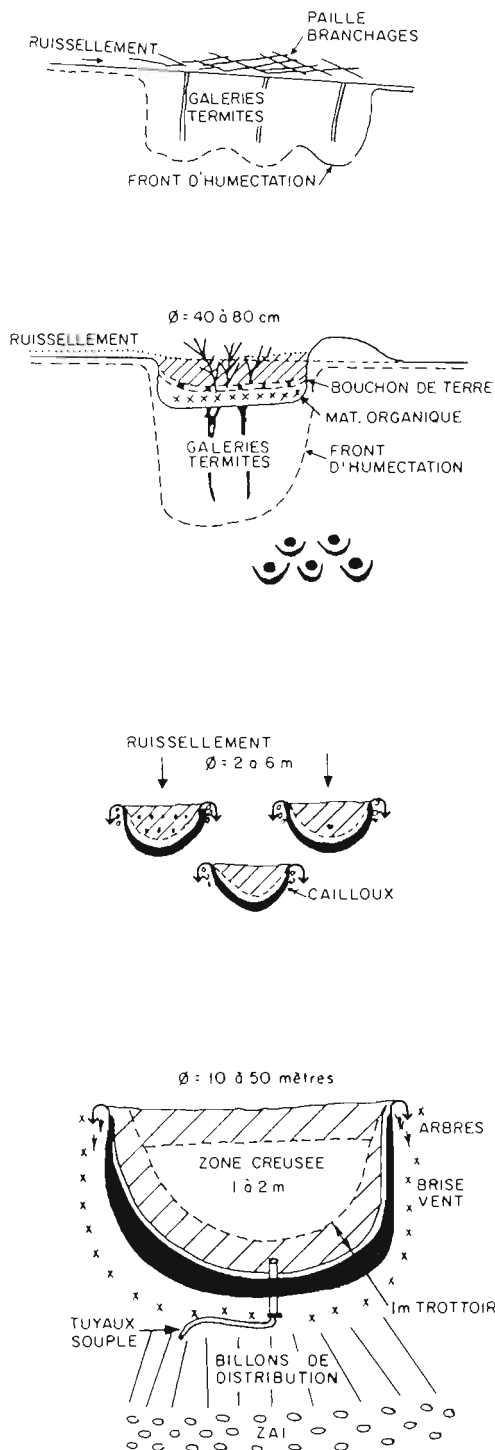


FIGURE 37

Collecte et stockage du ruissellement sur versant semi-aride (d'après Roose, 1989)

**Paillage** (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 50-80 cm Ø, 10-15 cm en profondeur, terre en aval en croissant
→ capte le ruissellement sur bassin 3/1
- concentration eau + M.O. + nutriments
→ rendement > 800 kg/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)

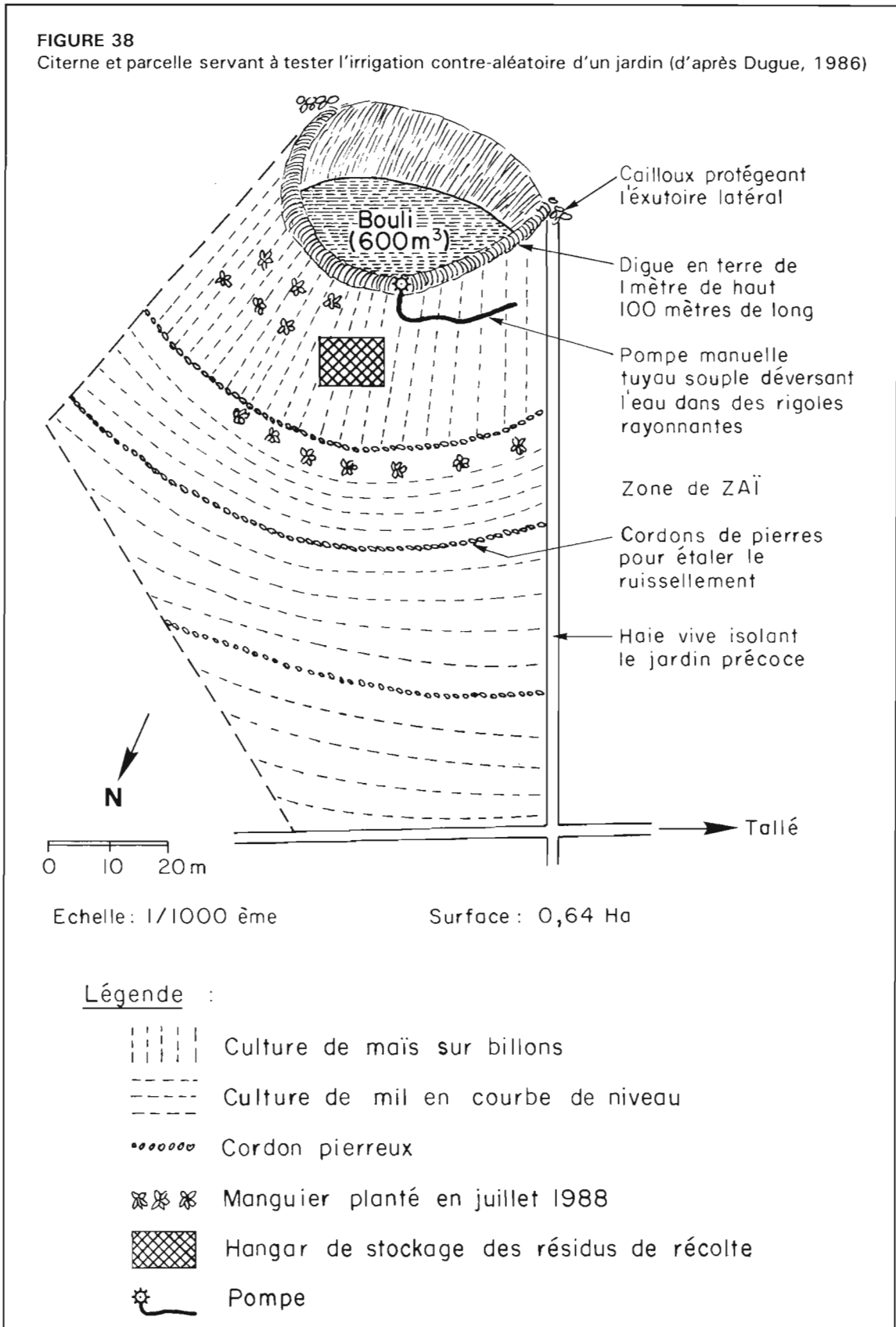
- sur glaciais limoneux, capture du ruiss. sur 10-20 m² pour irriguer :
 - des céréales
 - 1 ou 2 arbres
- protéger l'extrémité des diguettes par 3 cailloux pour éviter l'érosion lors du débordement

Boulis = citerne creusée au bas d'un glaciais à la limite du parcours

- digue construite avec la terre extraite progressivement du 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

FIGURE 38

Citerne et parcelle servant à tester l'irrigation contre-aléatoire d'un jardin (d'après Dugue, 1986)



par la même occasion, le problème de l'aménagement des ravines qui pourraient se stabiliser 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 mètre de hauteur.

Certains dangers doivent être pris en compte : 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 par un tuyau souple siphonnant l'eau jusqu'à un filtre (fût de 200 litres rempli 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...).

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 (figure 39). 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 abondants risquent de réduire la production par engorgement temporaire du sol (Hudson, 1990) et casser les digues.

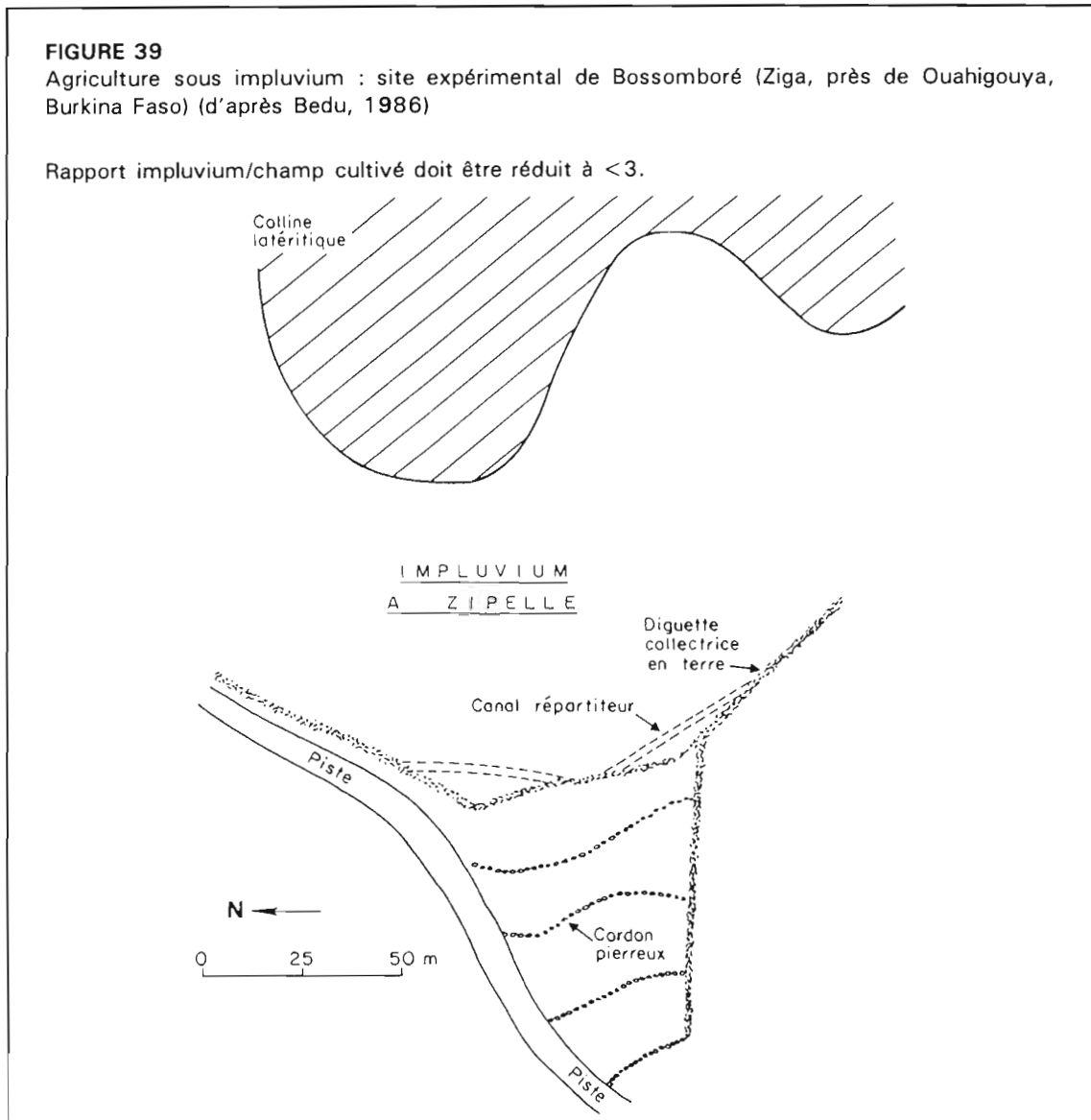
Au Kenya dans le district de Turkana, Finkel (1986) a élaboré un modèle simple pour estimer le rapport entre la surface d'impluvium et le champ cultivé :

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

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), mais les digues ont été endommagées récemment, en année humide (communication de Reij, 1991). Dans la zone des 600 mm autour de Ouahigouya, ce rapport serait de 1 à 3.

Les micro-bassins (Negarim microcatchment)

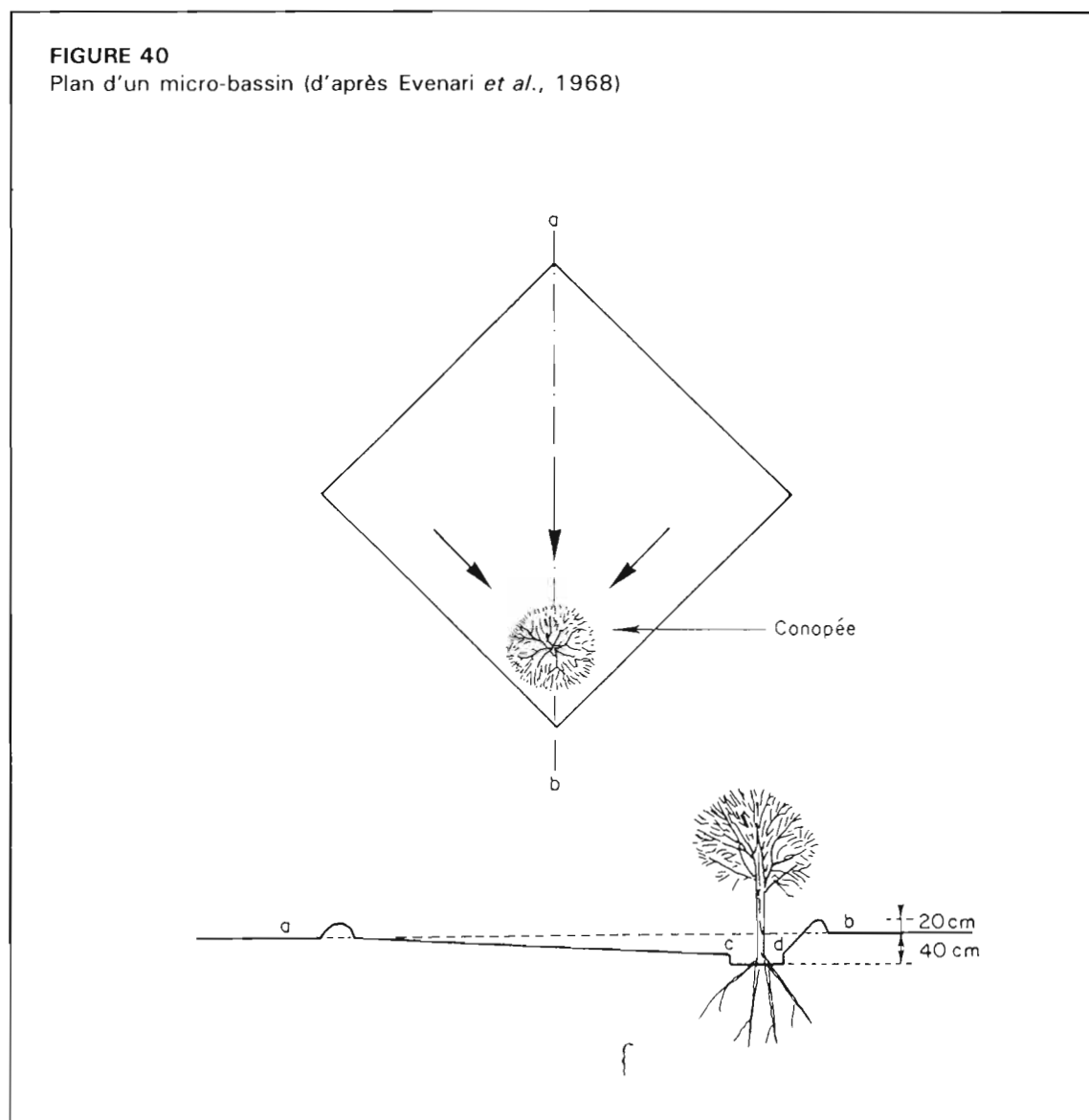
Le système probablement le plus connu d'impluvium permettant de récolter de l'eau sur des courtes pentes pour irriguer une culture d'arbres, est certainement les micro-bassins (figure 40). L'élément de base est une petite excavation formant un bassin d'infiltration et une



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 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.

L'aménagement en planches collectant le drainage dans une citerne (vertisol)

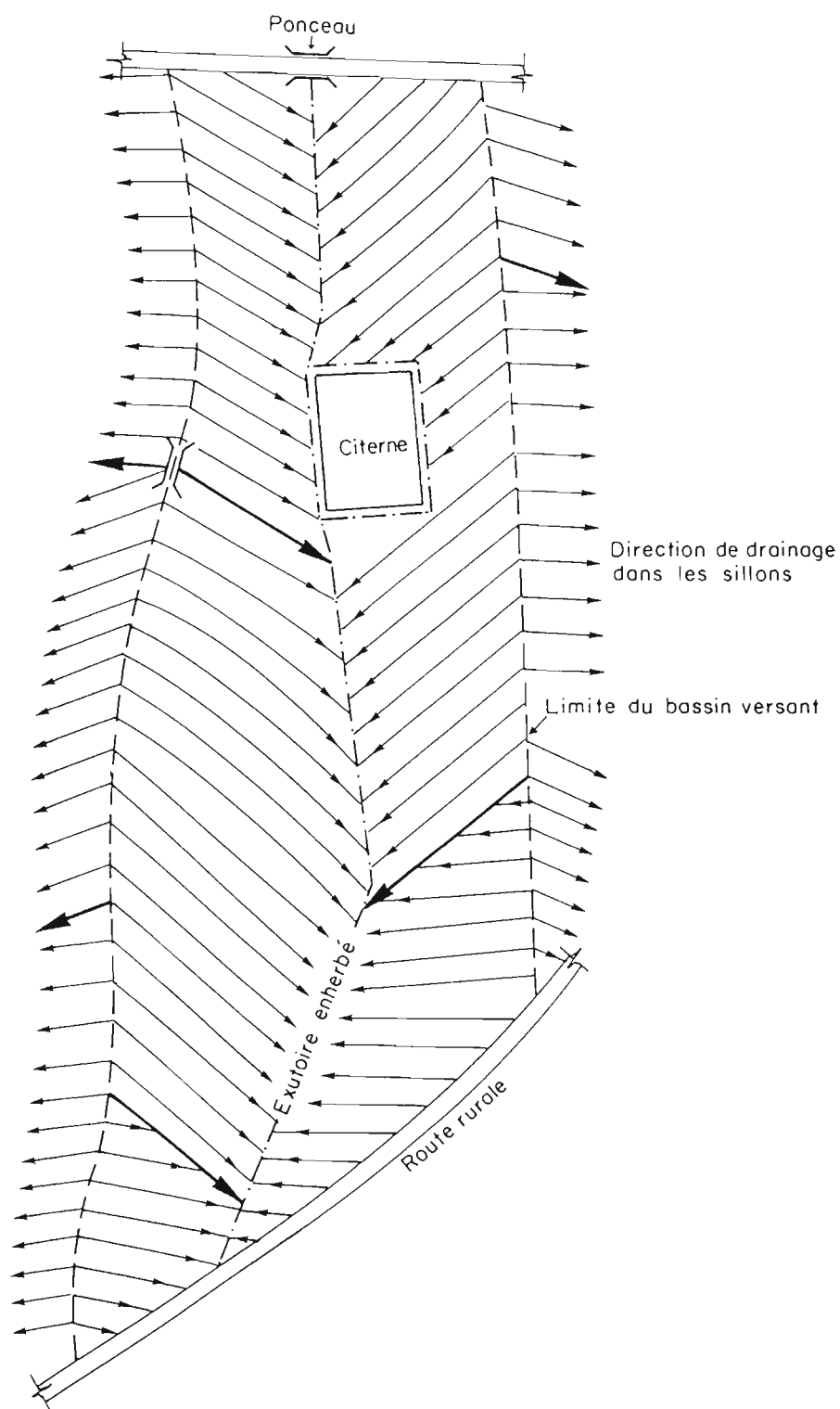
Les vertisols sont des sols très argileux et assez fertiles chimiquement, mais extrêmement difficiles à cultiver en saison des pluies. A cette époque en effet, ils sont boueux et manquent de portance. Par contre, il est possible de les labourer en saison sèche un mois après la fin des pluies et de dessiner sur les champs un ensemble de planches de 1,50 m de largeur séparées par des petits sillons en pente légère (0,5 %) qui vont ramener les eaux de drainage vers un exutoire et une citerne creusée dans la terre (figure 41). 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 semées 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 en cours ou en fin de 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 : il ne convient pas pour les sols rouges ferrugineux tropicaux dont la réserve hydrique est trop faible.

FIGURE 41

Aménagement d'une parcelle en planches drainées par un sillon vers un exutoire enherbé et une citerne sur un vertisol du Centre ICRISAT de Hyderabad (d'après Kampen *et al.*, 1981)



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 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). Les techniques culturales telles que le billonnage cloisonné, le paillage, ou une couverture permanente, entraînent une infiltration quasi totale des eaux de pluie et cassent 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.

LES STRUCTURES D'INFILTRATION TOTALE

Les structures d'infiltration totale sont utilisées dans deux cas : lorsque les pluies suffisent à peine à assurer l'évapotranspiration des cultures, ou dans les milieux très perméables.

Les fossés aveugles avec talus enherbés du Rwanda (ou le fanya juu du Kenya) (figure 42).

Au Rwanda et Burundi, les Belges ont proposé jadis, vers les années 1935, de creuser des fossés hysohypses 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 3 m de long et 60 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* ou Vetiver).

FIGURE 42

Fossés aveugles avec talus amont enherbé

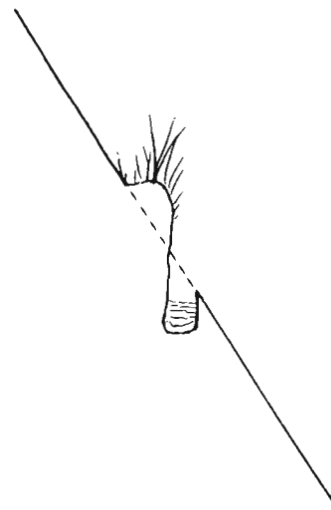
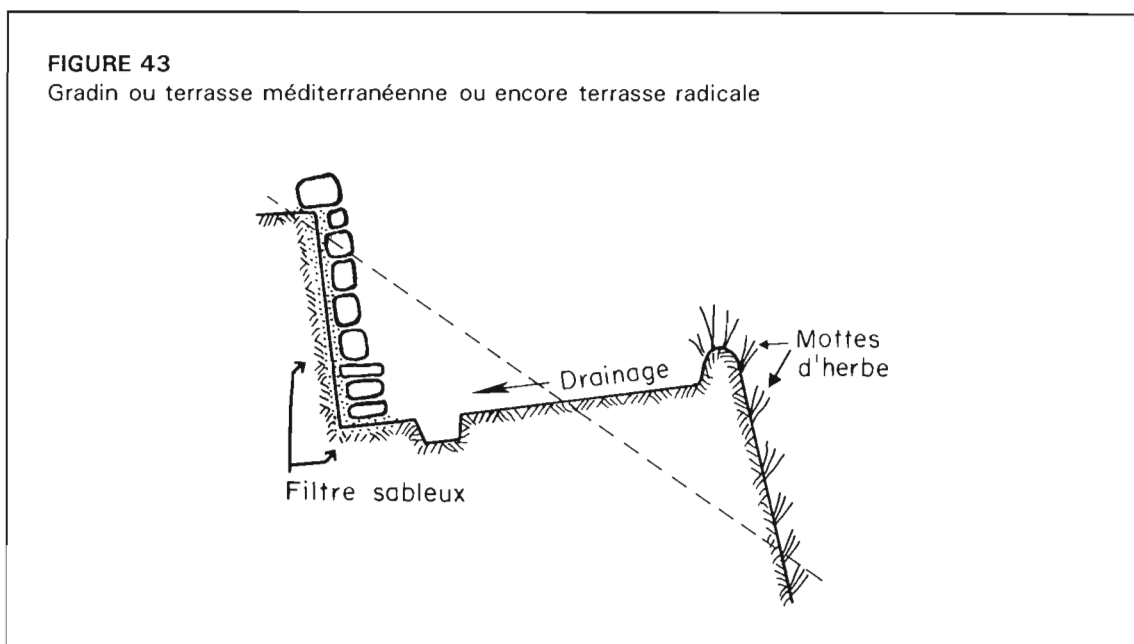


FIGURE 43

Gradin ou terrasse méditerranéenne ou encore terrasse radicale



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 ravinelements et glissements de terrain.
- Cette méthode nécessite 300 jours de travail à l'hectare lors du creusement et 20 à 50 jours 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 m) 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 les cendres volcaniques sur granit), ces fossés augmentent les risques de glissement de terrain en accélérant l'accès de l'eau au plan de glissement.
- 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 et réduire les risques de glissement, et enfin par des haies vives ou des arbustes fruitiers retillés chaque année pour le maintien du haut du talus.

La plantation de grands 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, 1990).

Les gradins ou terrasses méditerranéennes (bench terracing) (figure 43)

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 les zones planes manquent, là 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, le kif dans le Rif central et le khat dans la région de Hararghe en Ethiopie).

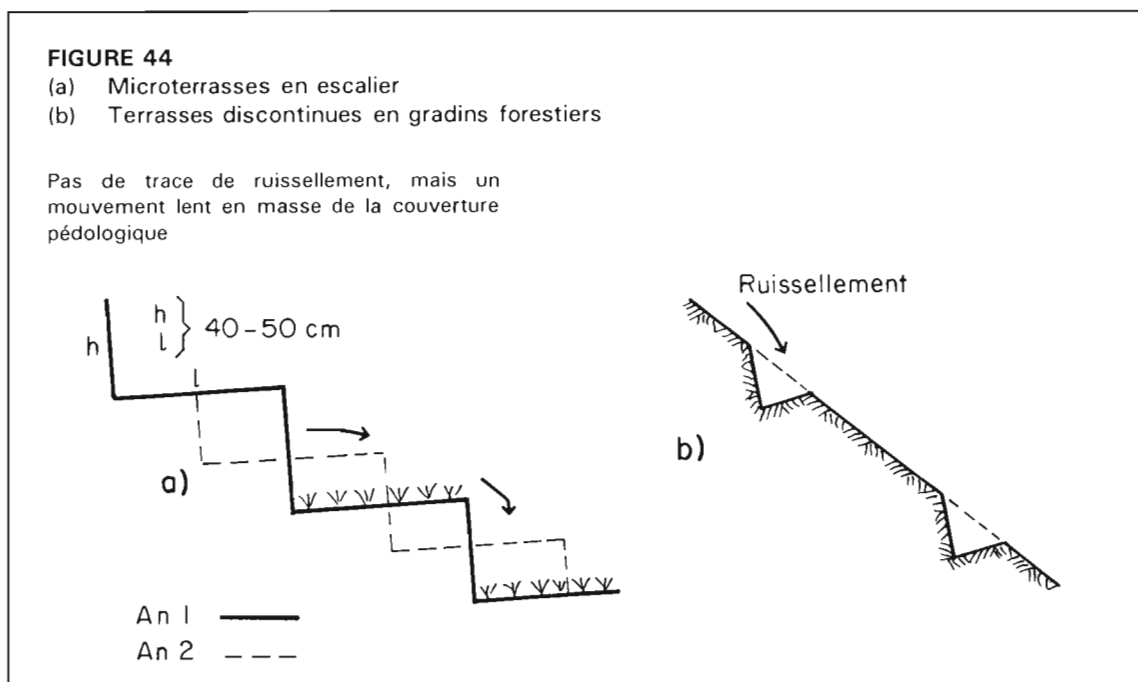
Les gradins sont formés d'un talus subvertical renforcé par des pierres ou par des herbes et d'une terrasse en pente douce inversée avec possibilité d'irrigation et de drainage de la pente en long.

Avantages :

- Les gradins créent des zones planes et suppriment l'érosion en nappe,
- ils permettent d'investir et d'améliorer la productivité des terres sur forte pente,
- ils augmentent l'eau disponible pour les plantes,
- et permettent 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 1 200 jours de travail pour aménager un hectare et exige ensuite l'entretien des talus.
- Il 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 dans des zones à forte fréquence 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 %. Il faut prévoir la disposition des chemins en aval des talus.

La méthode traditionnelle des **micro-terrasses en escaliers** (figure 44), 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 (Rwehumbiza et Roose, 1991 ; Hudson, 1973 ; 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'infiltreront 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.

Conclusion

Les structures d'infiltration totale apportent des solutions radicales en zone semi-aride où la production végétale est étroitement liée à la disponibilité en eau et sur les pentes fortes où il est délicat de gérer le ruissellement sans créer de ravines.

Cependant, ces méthodes exigent un fort investissement à l'installation et à l'entretien. De plus, elles ne peuvent s'implanter n'importe où sans augmenter les risques de glissement de terrain et de lixiviation des nutriments.

LA DIVERSION DES EAUX EXCEDENTAIRES

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 (figure 45) pour récupérer les nappes ruisselantes avant qu'elles aient acquis une énergie suffisante pour raviner le versant. Ces eaux de ruissellement 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 de la rivière sans créer de dégâts trop importants.

Ce mode de gestion des eaux 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

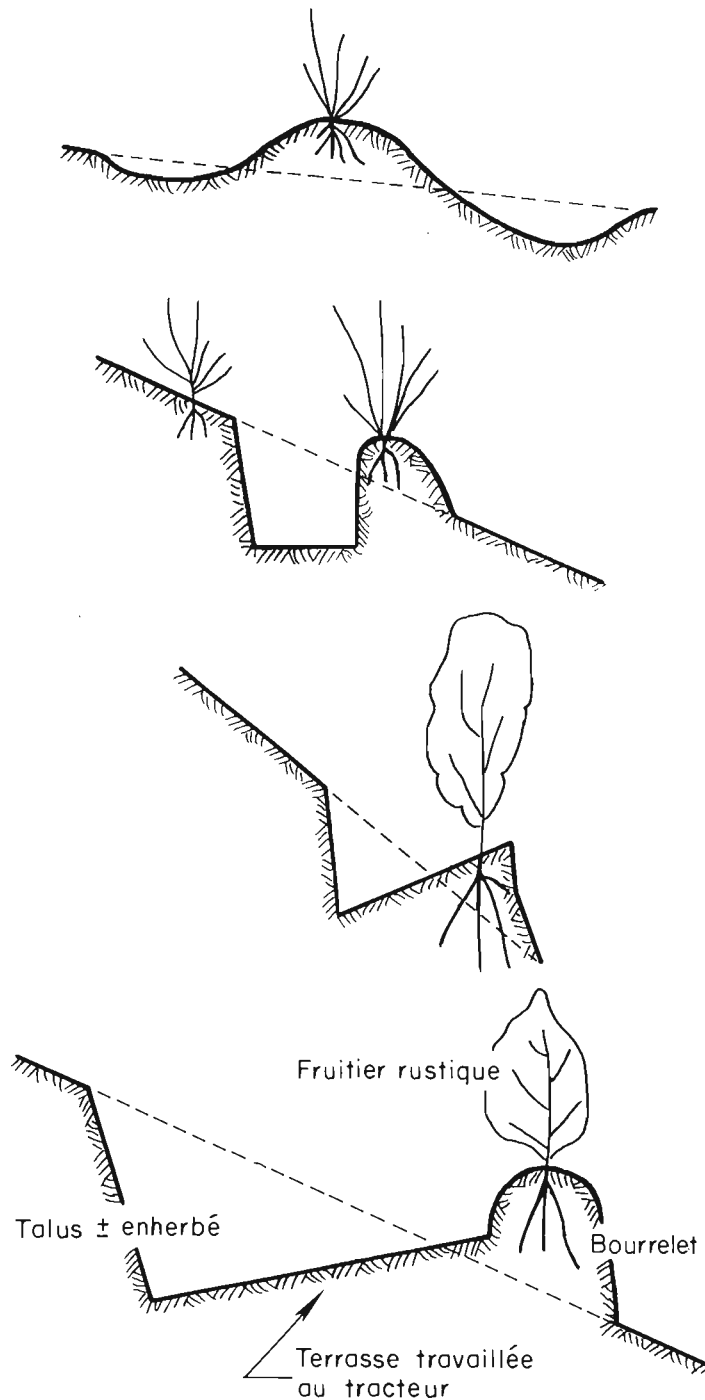
Inconvénients : Ces fossés constituent une perte de surface cultivable de 5 à 15 %.

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 : elles 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. En Afrique, ce système étant rarement correctement entretenu, aboutit généralement 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.

On peut voir au tableau 34, la faible efficacité des bourrelets de diversion sur le ruissellement, l'érosion et les rendements pour des cultures menées avec un labour intensif motorisé sur un sol ferrugineux tropical peu profond sur nappe gravillonnaire (Roose, Piot, 1984). Sur un glaciais d'une pente de 0,7 % le CTFT a comparé entre 1967 et 1972 sur quatre parcelles le ruissellement, l'érosion et les rendements sur une parcelle standard, sur un champ

FIGURE 45
Diverses structures de diversion du ruissellement



Bourrelet de diversion en terre

- 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 fouisseurs qui y trouvent une terre souple pour creuser leurs galeries ;
- pas adapté aux vertisols et autres sols se fissurant en saison sèche.

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'il augmente l'infiltration.

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).

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 (crainte d'appropriation par l'Etat).

FIGURE 46

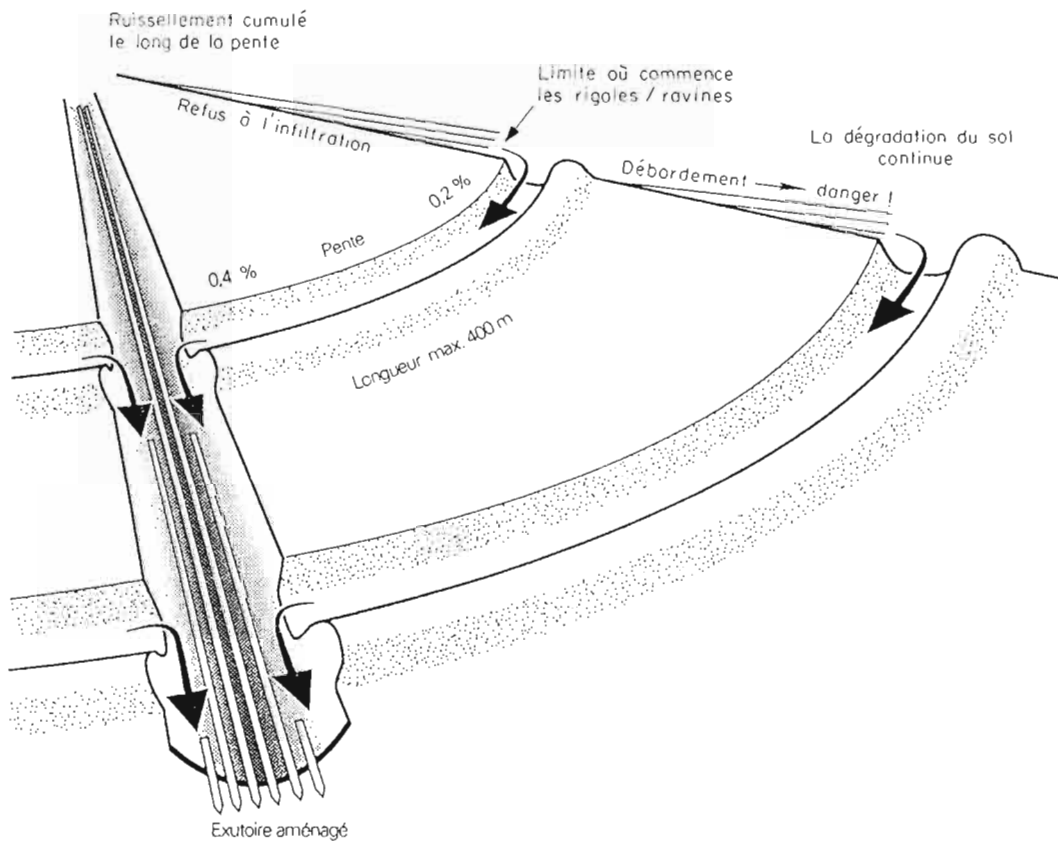
La diversion des eaux de ruissellement : principes, pratique et inconvénients

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 $(MV^2)/2$. $E = f(\text{longueur}^n \times \text{pente})^m$)

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 (surcrausés 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
 - ravinement régressif

TABLEAU 34

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 Ouagoudougou (Burkina Faso) (d'après Roose et Piot, 1984)

Surface des parcelles (environ 0,5 ha)	Ruissellement : KR %		Erosion t/ha/an	Rapport des rendements en % du témoin
	Max 24 h	KRAM		
Bourrelets diversion dH = 40 cm + labour + sarclo binage perpendiculaire à la pente	cloisonné	31	4	106
	non cloisonné	37	20	
Idem mais billons // pente, non cloisonnés		45	24	98
Traditionnel Mossi = non labour Semis direct en poquets, puis 2 sarclages		43	23	100
Sol nu (standard USLE) (100 m ²)		70	40	-

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 sarclage et de billonnage, soit parallèlement à la pente et non cloisonné, soit perpendiculairement 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 à 20-24 % 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 t/ha/an sur sol nu. Elle est réduite au quart sur les sols cultivés, un peu plus forte sur les sols billonnés dans le sens de la pente, mais significativement réduite si le billonnage est perpendiculaire à la pente et cloisonné. Il n'y a cependant pas de différence significative dans les rendements, que l'on soit dans un système traditionnel sans labour ou dans un système élaboré faisant intervenir de nombreuses techniques culturales ainsi que des structures antiérosives de diversion. Sur ces sols peu épais et peu productifs, 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 minimes 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 risquent d'être entraînés par les eaux de drainage.

Conclusion sur les structures de diversion

Suite au manuel de Bennet et aux travaux des américains, des structures de diversion des eaux de ruissellement ont été implantées partout dans le monde pendant 50 ans sans aucune vérification de leur efficacité, ni de leur adaptation aux conditions socio-économiques régionales.

On constate aujourd'hui leur faible efficacité aussi bien en zone méditerranéenne, qu'en région soudano-sahélienne (Burkina Faso, Niger) que dans les montagnes d'Afrique centrale ou les longs glaciers d'Afrique du sud. Ce sont des méthodes qui coûtent cher (surtout la topographie), réduisent les surfaces cultivables, n'arrêtent pas la dégradation de la fertilité du sol, ni l'érosion en nappe. Elles ne peuvent se justifier que dans des systèmes de culture motorisés, mais sont difficiles à maintenir : donc à éviter dans les pays en développement.

LES STRUCTURES DE DISSIPATION DE L'ENERGIE DU RUISSELLEMENT

Au cas où les pluies dépassent la capacité d'infiltration du sol, on peut aussi gérer des nappes 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 posent problème.

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) (figure 20).

Cette dispersion tout au long du versant se fait d'une part par les techniques culturales entretenant la rugosité 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 du type "**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.

Les bandes d'arrêt enherbées (tableau 35) ont réduit le ruissellement à 30 ou 60 % du témoin et l'érosion à 30 et jusqu'à 10 % du témoin.

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

König (1992), dans la station expérimentale de 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 7 t/ha/an. Les haies de *Setaria*, quant à elles, sont encore deux fois plus efficaces pour réduire l'érosion (0,3 t/ha/an), mais s'épuisent au bout de 3-5 ans d'exploitation fourragère (tableau 36).

Ndayizigiyé (1992), à la station ISAR de Rubona, à une vingtaine de kilomètres de Butaré (Rwanda), a comparé l'efficacité antiérosive des haies arbustives de *Calliandra*, *Calliandra* plus *Setaria* et *Leucaena* (deux lignes à 50 cm de distance) plantées à sept mètres d'intervalle sur une pente de 24 % sur un sol ferrallitique sablo-argileux très désaturé.

TABLEAU 35

Influence des bandes d'arrêt et du travail du sol suivant les courbes de niveau en zone tropicale humide et sèche (expérimentations en parcelles d'érosion) (d'après Roose et Bertrand, 1971)

Bandes d'arrêt	Largeur	0 m	2 m	4 m	Rapport efficacité
Adiopodoumé (1965) Pluie : 2300 mm Manioc Pente 7 %	KR % E t/ha/an	16,5 18,9	10,3 5,7	6,0 1,8	1-0,6-0,3 1-0,3-0,1
Bouaké (1965-66) Pluie : 1180 mm Arachide/maïs Pente 4 %	KR % E t/ha/an	12,6 7,6	5,1 0,9	3,8 0,6	1-0,4-0,3 1-0,1-0,08

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	Rapport efficacité
Allokoto (1966-71) Pluie : 437 mm Arachide, mil, sorgho, coton Pente 4 %					
R % E t/ha/an	17,6 9,5	5,2 1,1	3,8 0,5	0,9 0,3	1-0,3-0,2-0,5 1-0,1-0,05-0,03

TABLEAU 36

Effet sur l'érosion des haies vives en graminées (*Setaria*) ou en arbustes (*Leucaena* ou *Calliandra*) (sur la colline de Ruhande près de Butare au Rwanda) (d'après König, 1991)

Traitement	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 m plantée	12,3
- haie de <i>Calliandra</i> tous les 10 m semée	7,6
- haie de <i>Leucaena</i> tous les 10 m plantée	7,4
- idem + billons tous les 5 m	3,9
- haie de <i>Setaria</i> bouturée	3,2

- ° haies = trois lignes en quinconce sur terrasse horizontale d'un mètre de large, tous les 10 mètres
- ° culture en allée = deux lignes d'arbustes tous les 5 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 5 mètres

Pour des pluies variant de 1 000 à 1 250 mm établies sur dix mois, le coefficient de ruissellement annuel moyen sur les terrains (sol nu ou cultures traditionnelles) reste modéré (6 à 12 %), mais il tend à augmenter à mesure que la surface du sol se dégrade. Il peut dépasser 45 à 50 % par les plus fortes averses en deuxième saison humide sur sol détrempé. A l'inverse, dans les parcelles protégées par les haies vives, le ruissellement tend à diminuer à moins de 2 % quel que soit le type de végétation, surtout depuis qu'on répand les émondes à la surface du sol entre les cultures et qu'on dispose les adventices collectées lors du sarclage au pied des haies vives.

L'érosion atteint 300 à 500 t/ha/an sur le témoin en sol nu, 100 à 250 t/ha/an sous culture traditionnelle, mais tend vers 1 t/ha/an sur les parcelles protégées par les haies vives. On peut donc considérer que les parcelles aménagées sont stables au bout de deux à trois années : la CES est réussie, mais qu'en est-il du rendement des cultures ?

Les essais montrent que la production de biomasse des haies arbustives croît progressivement de 1,5 à 3,2 kg/mètre linéaire, que la présence d'herbes (*Setaria*) au pied des arbustes donne de bons résultats dès la première année, mais qu'ensuite, le *Calliandra* pur produit plus que le *Leucaena*, et enfin que la remontée de nutriments grâce aux racines profondes des arbustes peut atteindre 78 kg d'azote, 10 kg de phosphore, et 17 kg/ha/an de potassium qui sont redistribués sous forme de paillage au cours de la croissance des cultures.

On avait espéré qu'en combinant l'apport des émondes des haies vives et 10 t/ha/an de fumier (poudrette de parc), on allait améliorer progressivement la production des cultures. En réalité, le niveau de production est resté médiocre (500 à 250 kg/ha de maïs, plus 500 à 800 kg/ha de haricots en première saison et 450 à 650 kg/ha de sorgho en deuxième saison). Ce n'est qu'en quatrième année qu'on a compris qu'il fallait restaurer la fertilité du sol (apport de 2,5 t/ha de chaux, plus 10 t/ha de fumier de parc, plus 300 kg/ha de NPK (17.17.17) pour que la production des cultures augmente significativement (plus de 2 t/ha de haricot, 1,4 t/ha de sorgho).

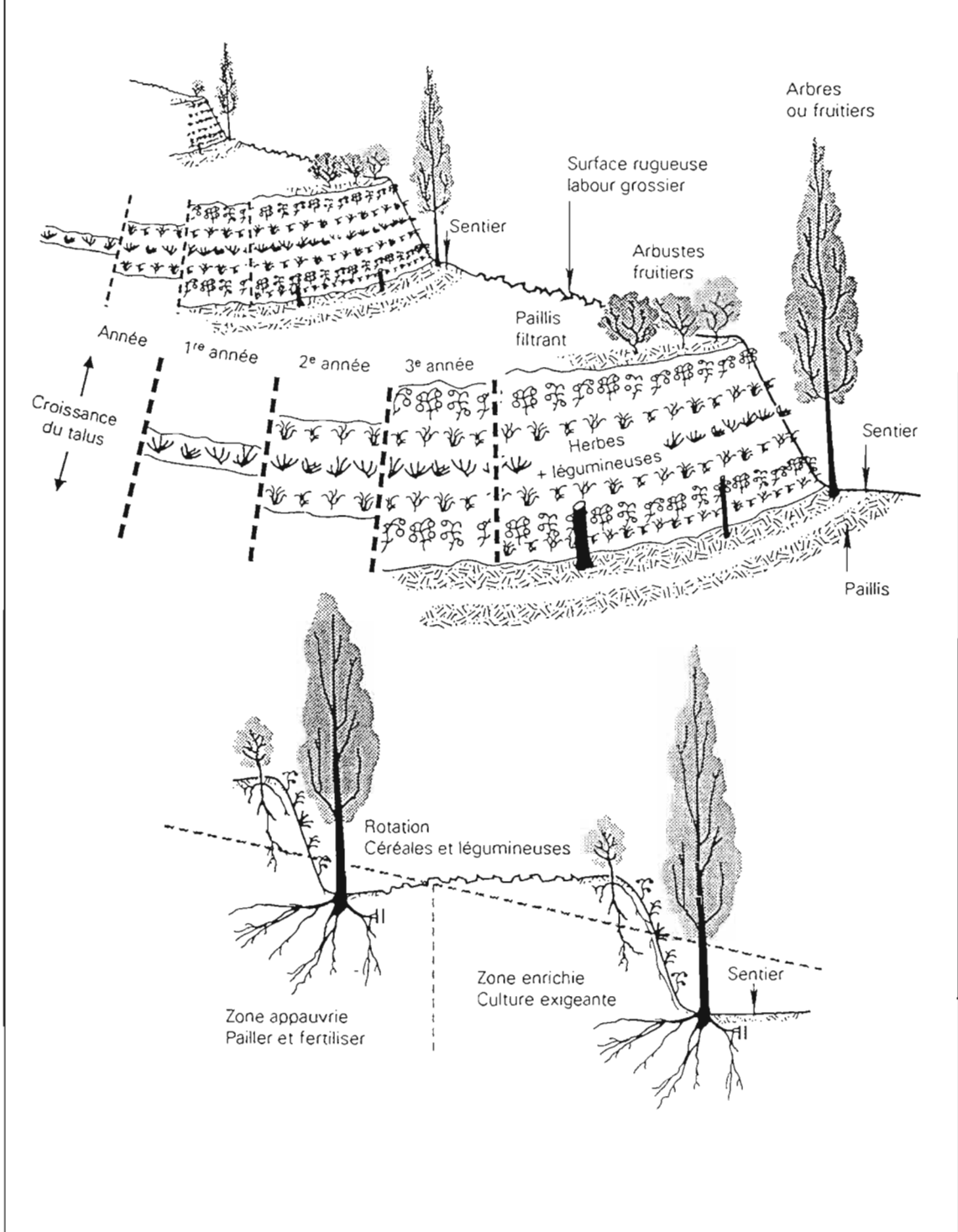
Les talus enherbés complexes: Les micro-barrages (bandes enherbées, haies vives, etc...) aboutissent en quelques années à la formation de terrasses progressives entrecoupées de talus à pente raide protégés par un tapis herbacé.

La figure 47 représente 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) et les difficultés d'exploitation. (Roose, 1990).

Comme l'efficacité de telles mesures diminue si le talus n'est pas continu sur toute la colline, il est recommandé de le piqueter en totalité 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). Or, si la bande enherbée est discontinuée, les eaux de ruissellement vont se précipiter dans cette brèche, creuser une ravine et miner tout l'aménagement.

FIGURE 47

Modèle évolutif de structure antiérosive perméable en vue de la dissipation de l'énergie du ruissellement (d'après Roose, 1991)



COMMENTAIRES

Objectif

1. Briser l'énergie du ruissellement en étalant la nappe à la surface du sol protégée par un tapis dense de graminées.
2. Modifier la couverture pédologique en une suite de zones cultivées à pente faible et de talus protégés (hauteur 0,5 à 2 mètres selon l'épaisseur et la résistance du sol).

Méthodes

- an 1 : Tracer la courbe de niveau (tous les 5 à 20 mètres selon la pente et l'épaisseur du sol) en plantant des graminées pérennes. Le labour va apporter 10 cm de sol en amont et retrancher 10 cm de sol en aval.
- an 2 : Planter 2 lignes supplémentaires de graminées X légumineuses.
- an 3 : Planter encore 2 lignes supplémentaires, puis planter des arbres à croissance vigoureuse au pied du talus pour réduire les risques de glissement.

La couverture pédologique étant devenue d'épaisseur variable, on peut faire pousser des plantes exigeantes en amont du talus (zone d'accumulation de sol, d'eau, de fertilité) et des plantes plus rustiques à l'aval du talus (zone de décapage à restaurer).

Avantages

Le terrassement se fait progressivement par érosion et surtout par le travail du sol (+ 20 cm de hauteur par an). L'aménagement est totalement maîtrisé par les paysans.

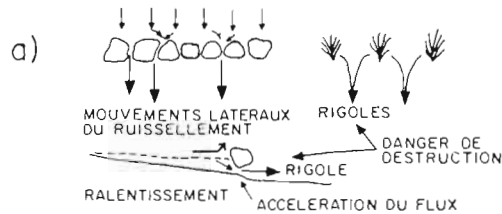
Cet aménagement ne demande pas de gros investissements, ni de gros entretiens : le piquetage n'exige pas une topographie aussi précise que les fossés.

Il n'y a pas de perte de terrain (6 à 20 % pour les fossés) car le talus est un lieu de production privilégié (bois, fruitiers, fourrages).

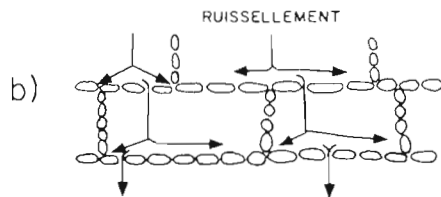
L'efficacité est maintenue en cas de très fortes averses et augmente avec le temps.

FIGURE 48

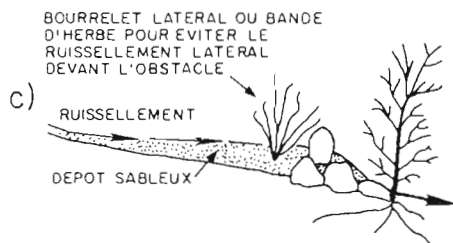
Exemples de micro-barrages perméables en milieu semi-aride (d'après Roose, 1989)

**Alignement de pierres (stone line)**
d'herbes, paille, piquets

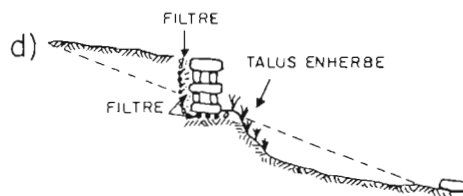
- une seule rangée d'obstacles perméables
- ralentit et étale le ruissellement
- piège le sable éolien + fines du ruissellement
- fragile : bousculé par bétail + rigole, enterrée par le ruissellement.

**Réseau en nid d'abeilles**

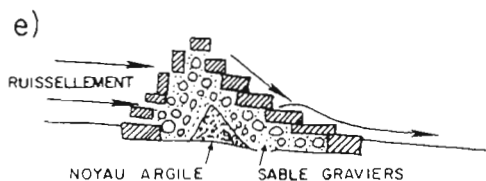
- cloisonnement → réduit les écoulements latéraux
- utilisé pour restaurer les sols en bas des collines gérées comme des impluvium

**Cordon de pierres (stone bund)**

- au moins 2-3 niveaux de pierres solidaires
- consolidé par :
 - herbes > < mouvements latéraux
 - haie + arbres > < bétail (en aval)
- piège 5 à 15 cm 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 en amont et dessous le mur
- aboutit à des terrasses progressives

**Digue 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

Les alignements de pierres, de piquets, de touffes d'herbe ou de paille (stone ou grass lines) (figure 48a et b)

Il s'agit d'obstacles perméables aux nappes d'eau ruisselantes établis en courbe de niveau sur une seule rangée. Ces alignements sont facilement observables en zone semi-aride soudano-sahélienne au Mali, Burkina et Niger. Ces alignements de pierres ralentissent le ruissellement qui s'étale en nappe de quelques centimètres d'épaisseur. A cause du ralentissement, ils provoquent 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 fèces des animaux déposés durant la saison sèche sur les parcours, les divers résidus organiques 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 une rigole à l'aval, puis sous les cailloux et les enterre.

En s'étalant devant l'obstacle, 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'herbe 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 chemins d'eau pour renforcer avec 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.

Les cordons de pierres (stone bunds) (figure 48c)

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 hectare en cordons de pierres (400 m) exige environ 30 à 60 jours de travail, 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'infiltré en moins d'une heure, provoquant ainsi 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 d'eau 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 fèces et diverses matières organiques flottantes, au point que les paysans considèrent que c'est là l'une de ses fonctions les plus utiles : garder en place la fertilité des sols.

Les cordons de pierres sont en principe installés perpendiculairement aux écoulements, mais pas forcément orientés perpendiculairement aux vents : ils ne piègent donc pas toujours les sables qui circulent en nappe en saison sèche.

Le premier niveau de pierres est "planté dans le sol" sur quelques centimètres et colmaté avec de la terre de manière à accumuler, en amont du cordon, 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, absorbent l'énergie du ruissellement et suppriment le creusement de rigoles à l'aval lors des averses importantes. 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 où le ruissellement accélère et creuse 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 aplanissement 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, 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 affleurantes 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 al, 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 (tableau 37, figure 49).

Les murettes de pierres sèches (stone walls) (figure 48d)

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, mettre en place, 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 de la terre de la tranchée vers l'amont, par érosion hydrique et surtout par érosion mécanique sèche lors des travaux cultureux.

Danger - La pression exercée par la couverture pédologique et par la nappe hydrique directement sur le mur peut déformer celui-ci en "un ventre" : le muret va finir par s'écrouler si on n'a pas prévu un bon drainage à l'amont du mur et une couche de gravier sous le mur.

Au cours du temps, le pied du mur va être déterré par érosion hydrique ou par les travaux cultureux dans le champ à l'aval du mur. Pour réduire cette évolution, 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.

Les digues filtrantes perméables et semi-perméables (figure 48e et 52)

Il s'agit d'entasser des grosses pierres sur une ligne, la crête étant en courbe de niveau, pour barrer une tête de vallée en vue de ralentir les écoulements et de favoriser l'alimentation de la nappe phréatique. La construction de ces énormes cordons de pierres peut prendre 300 à 600 jours de travail pour construire une digue de 100 à 300 m de long et de 1 à 2 m de haut. La largeur de la digue dépend de sa hauteur et de la profondeur du ravinement en chaque endroit. **Il faut que la crête de la digue soit absolument isohypse** et que cette digue 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.

TABLEAU 37

Expérimentation sur l'effet des cordons pierreux et du travail du sol sur le ruissellement, l'érosion et les rendements en mil à la station de Bidi (Samniweogo), nord Yatenga, Burkina Faso (d'après Serpantié, Lamachère, 1991)

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	239	1. Traditionnel	29	<u>35</u>	34	<u>75</u>	-	1080	137
		2. T + 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						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>	1,30	2290 (+10%)	438 (+21%)
Effet moyen sur 2-3-4 ans			Infiltration				Erosion	Biomasse	Grain
cordon - témoin			+ 4 %				- 34 %	+ 22 %	+ 22 %/4 ans
cordon + labour - cordon			+ 4,3 %				+ 52 %	+ 48 %	+ 61%/3 ans

35 = Nettement différent du traitement de référence

Notes concernant le tableau 37

Les traitements sont les suivants :

- 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 1980.
 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 plus 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 de sédimentation sont si développées que les gains d'infiltration dus aux cordons de pierres, deviennent négligeables.
- d. L'apport dû à l'impluvium est surtout sensible sur les parcelles amonts tant que les sols sont suffisamment absorbants : il augmente les risques de drainage à l'amont des cordons pierreux.
- 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.

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 très positive entre le travail du sol, la rugosité du terrain et l'efficacité des cordons pierreux (figures 50 et 51).
- 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 travail du sol est associé aux cordons de pierres. Cependant, lors des années les plus sèches (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 2 à 6 m ; le cordon de pierre se colmate sur 5 à 15 cm et améliore ainsi l'horizon humifère. Cette zone reçoit un apport supplémentaire d'eau qui peut améliorer l'alimentation hydrique des cultures, mais qui peut parfois présenter des risques d'engorgement et de lixiviation des nutriments par le drainage (le sorgho y est moins sensible que le mil).
 - A l'aval, des filets d'eau se fauillent entre le sommet 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 proposées pour réduire les mouvements obliques de ces eaux sont nombreuses : billonnage cloisonné ou débattage formant une grande rugosité à la surface de la parcelle, cloisonnement perpendiculaire au cordon ou implantation d'herbes (*Andropogon*) stabilisant le pourtour du cordon.

FIGURE 49
Plan d'ensemble du dispositif expérimental de Bidi (Burkina Faso)

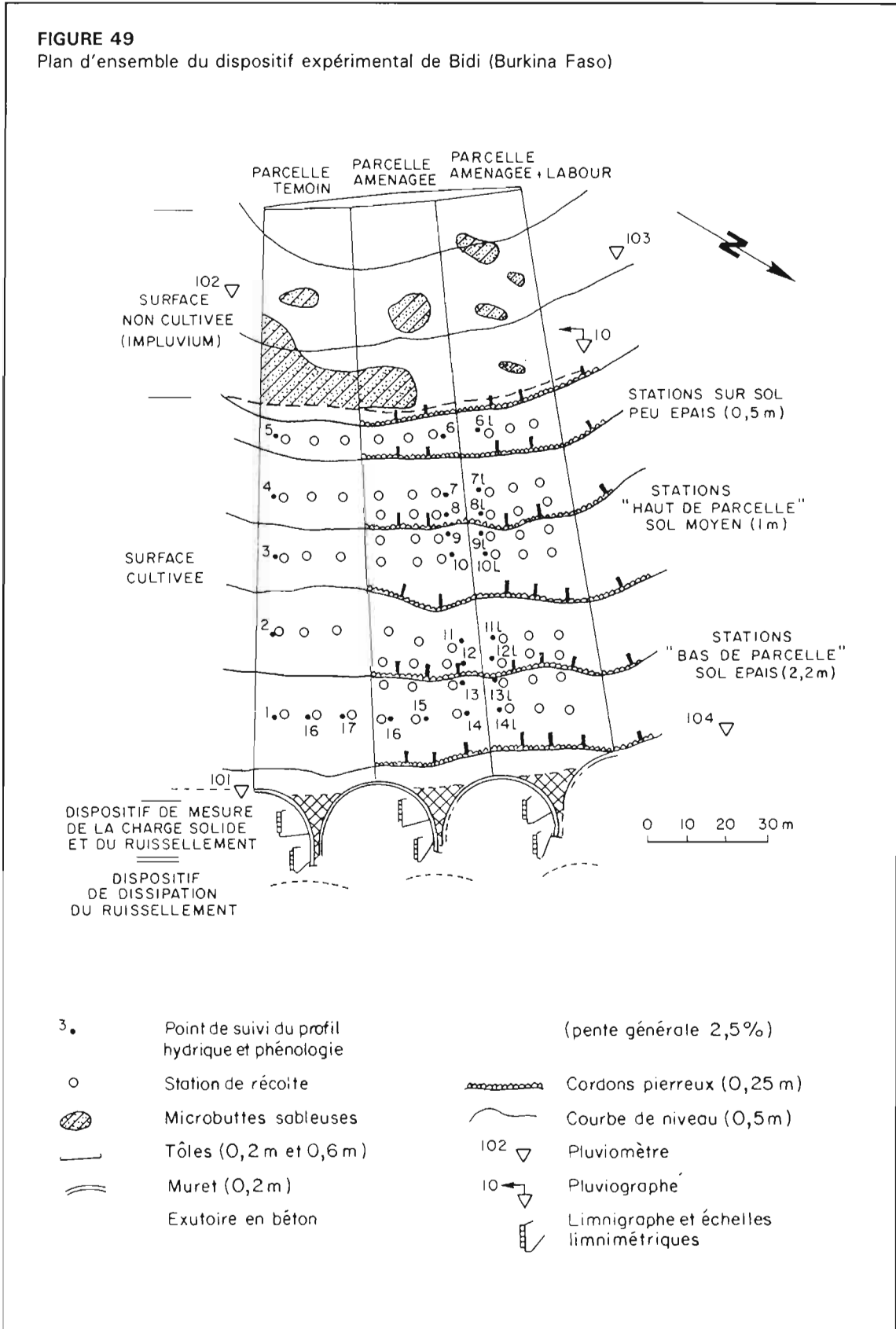


FIGURE 50

Comparaison des ruissellements : parcelle témoin/parcelle aménagée. Pluies standards

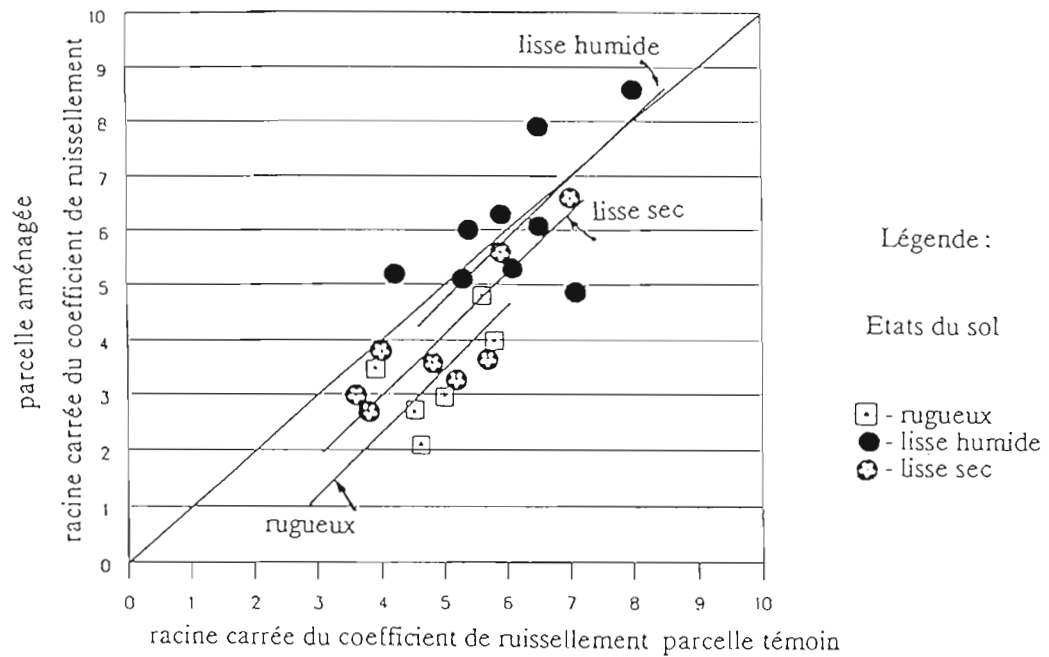


FIGURE 51

Comparaison des ruissellements : parcelles témoin/parcelles aménagées en fonction de l'agressivité des pluies (d'après Lamachère, Serpantié et Guillet, 1990)

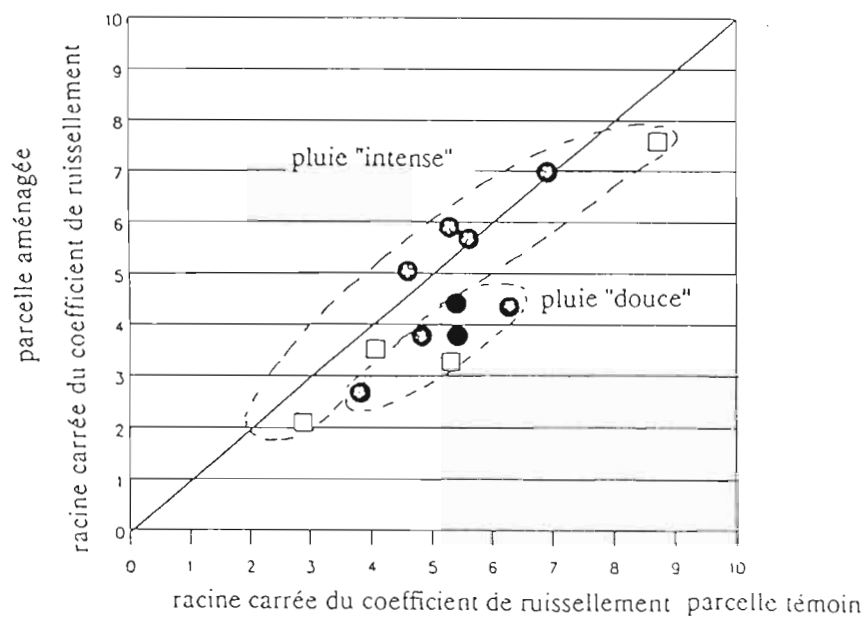
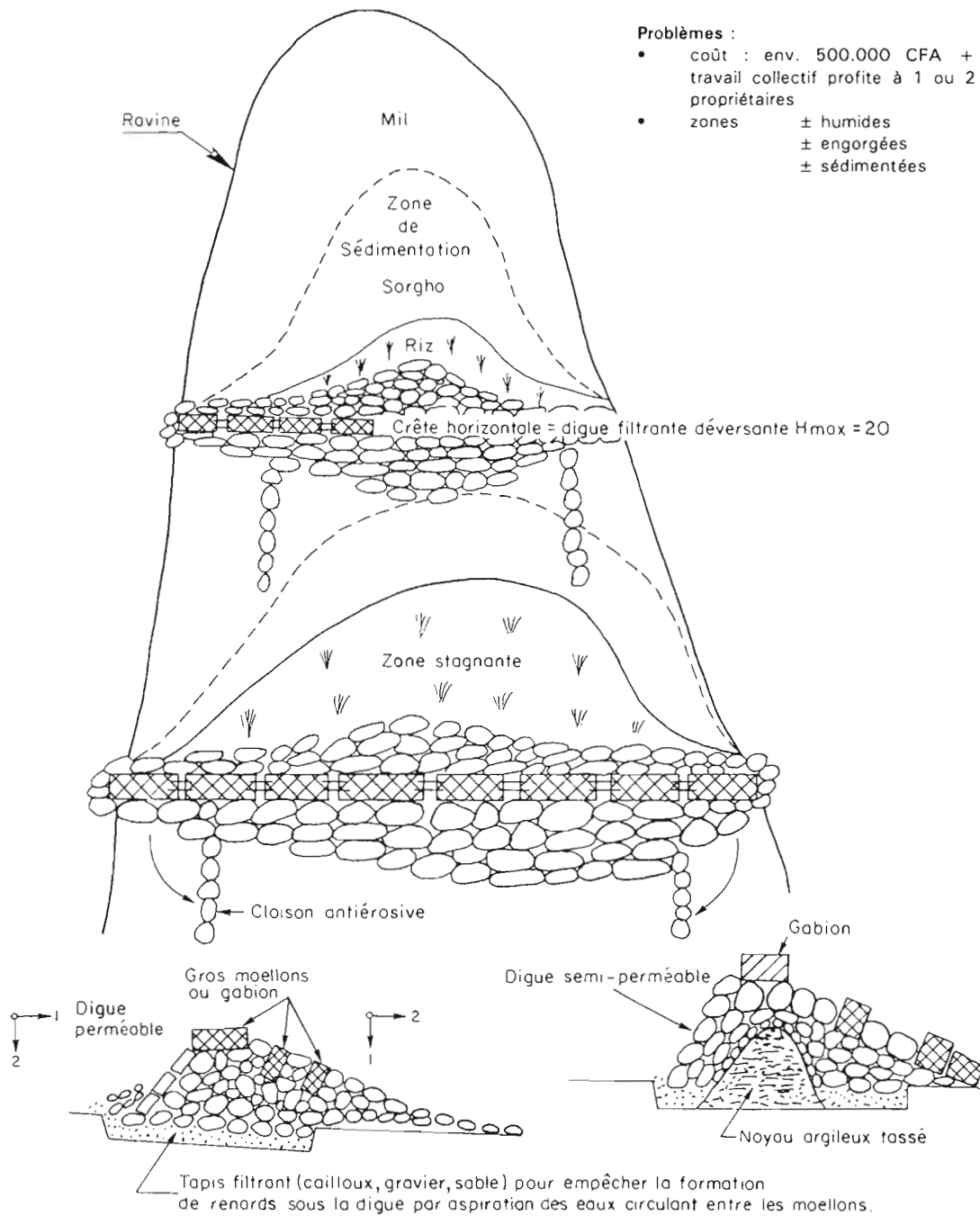


FIGURE 52
Digue filtrante ou semi-filtrante

- Effets :**
- rendements sorgho
 - sécurité
 - ralentit le ruissellement
 - érosion en ravine

- Problèmes :**
- coût : env. 500.000 CFA + travail collectif profite à 1 ou 2 propriétaires
 - zones ± humides
± engorgées
± sédimentées



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 à 50 cm par an) dans des zones collinaires ravinées (zone au nord de Ouagadougou : Dezilleau *et al.*, 1988).

Les dangers - Si la filtration est trop rapide à travers la digue de grosses pierres, on peut observer l'érosion creuser des "renards" sous la digue et en aval. Si la sous-pression 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 digue (figure 52).

Si la nappe d'eau dépasse la digue 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, des grosses pierres ou mieux, un petit gabion, de même que sur la face arrière de la digue (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 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 digue filtrante. Il faut donc bien préciser les objectifs. Les digues filtrantes améliorent l'alimentation de la nappe mais retiennent peu d'eau, en tout cas, pas assez pour produire du riz 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 cette culture.

Il faut noter aussi les risques de problèmes fonciers. 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 4 à 10 000 FF). 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, ce qui n'est pas toujours possible. Une autre solution est de négocier une forme de paiement du bénéficiaire aux voisins qui l'aident, en créant une banque qui avance les fonds et les récupère sur les récoltes améliorées des années suivantes (repas offert sur le terrain, salaire en espèces ou engagement d'aller travailler plusieurs jours chez les autres).

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 cordons de pierres. Il reste à savoir si cet aménagement 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 assurer une certaine production.

Il est donc essentiel pour la sécurité alimentaire d'un ménage de mettre en valeur à la fois des terres de bas-fonds qui produiront même en 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 valable dans certains bas-fonds ravinés mais beaucoup moins dans des fonds plats où il se produit très peu de sédimentation.

En conclusion, les micro-barrages semi-perméables sont très variés. Ils ont l'avantage d'être facilement maîtrisés par les villageois et de modifier les conditions topographiques (l'inclinaison de la pente). Cependant, ils laissent perdre 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.

LA VARIABILITE DES FACTEURS DE L'EROSION

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.

L'analyse des résultats disponibles dans le cadre de l'équation de prévision de l'érosion, soit environ 560 parcelles/an, permet de passer en revue et de quantifier ces différents facteurs (Roose, 1975) :

- **L'indice d'agressivité climatique** (R_{USA}) est très élevé : il croît de 200 unités au nord du Burkina Faso à plus de 1400 en Basse Côte d'Ivoire (figure 17). 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.

R, l'érosivité des pluies, varie de 100 à 2000

- **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 $0,70$)

K, l'érodibilité des sols, varie de 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 $0,10$ à $0,20$ ou $0,35$ avec la dégradation des sols sous culture.

- **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 (l'exposant = $\pm 1,4$ 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, l'indice topographique, varie de 0,1 à 5
(et jusqu'à 20 en montagne)

- **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.

C, l'interaction entre la couverture végétale et les
techniques culturales, varie entre 1 et 0,001

En conclusion, dans les régions tropicales 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 biologiques semblent possibles :

- 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 contre le feu et le surpâturage des zones les plus sensibles par une couverture permanente (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 de sédiments. 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 évoluant en talus et orientation approximative de tous les travaux culturaux perpendiculairement 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 du point de vue 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.

CONCLUSIONS SUR L'APPLICABILITE DU MODELE USLE EN AFRIQUE

Maintenant qu'on dispose d'un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelles expérimentales (plus de 560) en Afrique de l'ouest, du nord et du centre, on peut se poser des questions sur l'applicabilité de "l'équation universelle" de pertes en terre (Wischmeier et Smith, 1978) en Afrique (Roose, 1978).

- 1° Ce modèle ne s'applique qu'à **l'érosion en nappe et rigole** (donc à l'érosion naissante qui nous intéresse ici), dans les zones de collines à l'exclusion des zones montagneuses où dominent les glissements de terrain et l'érosion linéaire (rigoles, ravines et rivières). Il n'aborde ni le problème du mode de ruissellement, ni des transports en solution. A la limite, on peut modifier chaque sous-modèle pour tenir compte de l'énergie du ruissellement sur les fortes pentes.
- 2° Ce modèle empirique doit être basé sur un **grand nombre de résultats** répétés dans le temps et dans l'espace car il vise le comportement moyen à long terme (20 ans) des terres cultivées. L'usage de simulateurs de pluies (données ponctuelles pour chaque situation) peut compenser le manque de données sur parcelles sous pluies naturelles, mais ne peut pas les remplacer. Il est toujours difficile de comparer des résultats particuliers obtenus en simulation avec des données moyennes sur plusieurs années sur parcelles. Or, les expérimentations en station sont longues et coûteuses. En pratique, en l'absence de résultats localement bien représentés, on peut **s'appuyer sur les tables** présentées dans cet essai donnant les coefficients correspondants en Afrique ou aux Etats-unis (voir Wischmeier et Smith, 1978).
- 3° Ce modèle est basé sur des données provenant **de petites parcelles** (100 m²), des champs ou des bassins versants de surface très limitée (quelques hectares) : il se pose donc des **problèmes d'échelle** lorsqu'on tente de prévoir des valeurs régionales d'érosion et surtout, de transport solides sur de vastes bassins versants concernés par des aménagements hydrauliques craignant l'envasement.
- 4° La valeur **de l'érosion tolérée est difficile à préciser** car le modèle néglige l'aspect qualitatif des matériaux érodés. Or, la richesse de nombre des sols tropicaux se trouve stockée dans les 20 premiers centimètres (surtout sous forêt) et l'érosion en nappe arrache sélectivement les colloïdes organiques et minéraux ainsi que les nutriments qui assurent le réservoir hydrique et chimique du sol (Roose, 1967-73-80).
- 5° Le modèle **semble s'appliquer assez bien à des sols riches en kaolinite**, des sols bruns lessivés tempérés, des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, à l'exclusion des sols riches en argiles gonflantes (vertisols, sols bruns tropicaux, sols salés) qui manifestent très rapidement un ravinement important dû à leur faible capacité d'infiltration une fois qu'ils sont mouillés.
- 6° Enfin, ce modèle **néglige les interactions entre les différents facteurs**. Or, ces interactions se sont avérées très nombreuses à l'analyse des résultats. Ainsi, on a observé une grande différence de réaction de sol à l'agressivité des pluies en fonction de la pente, selon que le sol est argileux (rigoles) ou sableux (nappes) et selon l'état de surface du sol (rugosité due aux façons culturales, humidité préalable du sol, gestion des résidus de culture).

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 son intérêt scientifique** pour définir l'influence relative de chacun des facteurs en cause. Cette équation répond donc bien à sa vocation qui est de déterminer les techniques antiérosives à mettre en oeuvre dans chaque situation. Sur le vieux continent africain l'utilisation de l'équation de Wischmeier semble justifiée par une masse de résultats (560) se rapportant aux sols, aux plantes et aux pentes les plus couramment cultivées.

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 provenant des averses exceptionnelles**. Cette approche fréquentielle reste à faire.

La couverture du sol assurée par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui dépasse 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 pour estimer rapidement l'indice de résistance des sols à l'érosion, semble applicable à condition de lui ajouter un coefficient modérateur tenant compte des gravillons ou 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. L'analyse du mode d'apparition très particulier du ruissellement reste à faire.

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. Cette réserve est cependant importante 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. Ces réserves sont encore plus graves lorsque l'influence de la position topographique dépasse celle de la pente comme par exemple, dans le cas où l'érosion régressive a pour origine le réseau de drainage ou le fond de vallée.

TABLEAU 38

Estimation des méthodes antiérosives à mettre en oeuvre pour réduire l'érosion à une valeur tolérable (ici $E = 1$ t/ha/an) (exemple de la zone cotonnière soudano-sahélienne du Mali)

R	K	Risque E max t/ha/an	Méthode antiérosive	SL	C	P	Risques E t/ha/an
400	système extensif→0,3	120	(a) -	0,4	0,8	1	38,4
			(b) Fossé de diversion/50 m	0,24	0,8	0,5	11,5
			(c) Cordon de pierre/25 m	0,12	0,8	0,5	5,7
	système intensif→0,2	80	(a) -	0,4	0,4	0,5	6,4
			(b) Fossé de diversion/50 m	0,24	0,4	0,5	3,8
			(c) Cordon de pierre/25 m	0,12	0,4	0,5	1,9
			(a) + billons cloisonnés	0,4	0,4	0,1	1,3
(b) + billons cloisonnés	0,24	0,4	0,1	0,8			
(c) + billons cloisonnés	0,12	0,4	0,1	0,4			
(a) + paillage ou couverture vivante	0,4	0,01	1	0,3			

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.

LA PRATIQUE DU MODELE DE PREVISION DE L'EROSION DE WISCHMEIER

L'objectif est de définir un système de production (comprenant une rotation productive, des techniques culturales faisables et des structures antiérosives efficaces) qui maintiennent les risques d'érosion inférieure à la tolérance évaluée généralement entre 1 et 12 t/ha/an selon le type de sol.

Prenons l'exemple de la zone cotonnière soudano-sahélienne du Mali : (tableau 38)

1. Pluie = 800 mm : l'indice moyen $R = 800 \times 0,5 = 400$ t/ha/an (figure 17).
2. L'érodibilité K des sols ferrugineux tropicaux cultivés de la région varie de 0,3 s'ils sont dégradés, à 0,2 dans le cas d'un système intensif recyclant beaucoup de matières organiques (figures 20 et 21).

3. SL, l'indice topographique. Supposons que la culture se trouve sur un glacis de 2 % de pente et 300 mètres de longueur :

- à la figure 22, on trouve que $SL = 0,4$;
- si on introduit un fossé de diversion tous les 50 mètres, $SL = 0,24$;
- si on introduit un fossé de diversion tous les 25 mètres, $SL = 0,18$;
- si on introduit un cordon de pierres/haie vive tous les 25 m, $SL = 0,12$;

car chaque cordon fait un talus de 25 cm qui réduit l'inclinaison de la pente.

4. **Le facteur C**, pour une rotation continue, varie de 0,4 à 0,8 selon qu'on est en culture intensive ou extensive (tableau 29) :

- l'adjonction d'une arachide ne changerait rien ($C = 0,4$ à $0,8$) ;
- la succession de 4 années de culture + 4 années de jachère ferait diminuer C de moitié

$$C_{cscsjjjj} = \frac{0,4 + 0,4 + 0,4 + 0,4 + 0,1 + 0,01 + 0,01 + 0,01}{8} = 0,2$$

(Cscsjjjj pour une rotation culturale coton, sorgho, coton, sorgho, jachère, jachère, jachère, jachère)

A long terme, on a donc réduit les risques de moitié grâce à la jachère, mais on a supprimé 4 années de production.

Pour maintenir la production, il faudrait défricher une autre parcelle ; ceci n'est plus possible sous certaines zones de l'Afrique où la pression démographique pose un problème foncier.

- Une solution purement biologique est possible avec la pratique de paillage ou des plantes de couverture ($C = 0,01$ et $E = 0,32$ t/ha/an) sans faire appel ni aux structures antiérosives, ni au billonnage.

5. **Les pratiques antiérosives (P)**. Le calcul montre que l'introduction de structures antiérosives n'est pas suffisante : il faut modifier les pratiques culturales et/ou les rotations. Dans le meilleur des cas, avec un système intensif, des cordons de pierres tous les 25 mètres et le labour en courbe de niveau, les risques d'érosion sont encore doubles de la tolérance ($E = 1$ t/ha/an).

Si on introduit le billonnage isohypse cloisonné, l'érosion varie de 0,4 à 0,8 si on adopte les structures de dissipation ou de diversion du ruissellement. Voilà une deuxième solution, mais mécanique et donc plus coûteuse, mais plus facile à réaliser en zone semi-aride où la biomasse est consommée par le bétail et où la saison des pluies n'est pas assez longue pour produire une légumineuse semée en dérobée sous la céréale.



Chapitre 6

L'érosion linéaire

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, 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), ils 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 d'entailler 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 ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines.

Le traitement de l'érosion linéaire fait l'objet de manuels très documentés (Hudson, 1973 ; Gray and Leiser, 1982 ; Cemagref, 1982-88 ; Geyik, 1986 ; Heusch, 1988) et de très nombreux articles spécialisés (Boiffin *et al.*, 1986 ; Watson *et al.*, 1986 ; Govers *et al.*, 1987 ; Laflen, 1987 ; Meunier, 1989 ; Poesen, 1989 ; Deymier et Combes, 1992). Dans ce document, centré sur la lutte contre la dégradation des sols et l'érosion débutante, nous n'aborderons que la typologie du ravinement en relation avec leur cause et n'esquisserons que les méthodes d'aménagement des ravines moyennes à portée des paysans et les principes nécessaires aux développeurs non spécialisés pour éviter les principales causes d'échecs (voir les dix commandements). Pour la correction torrentielle et l'aménagement des plus grosses ravines, nous prions le lecteur de consulter les ouvrages spécialisés cités en bibliographie. Il en sera de même pour l'érosion en masse et l'érosion éolienne.

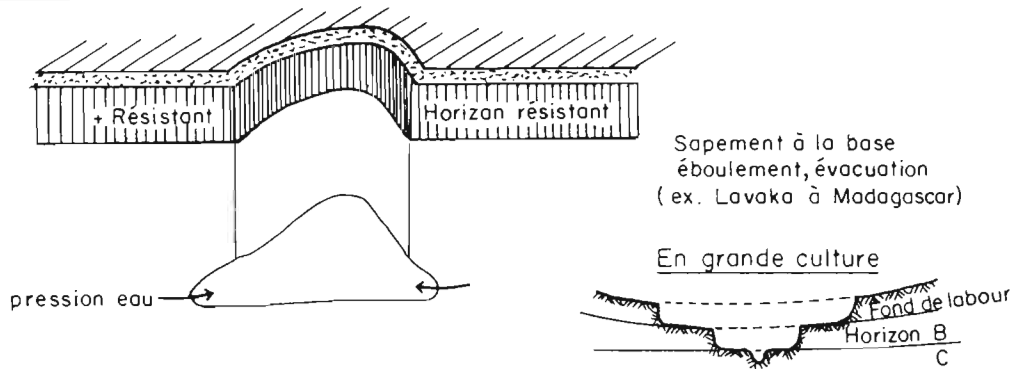
LES FORMES D'ÉROSION LINEAIRE

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 "délaissés de crues" composés souvent de matières organiques longues et fibreuses ou alors de dépôts sableux organisés en filets comme dans les oueds. L'érosion linéaire [planche photographique 13] 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 les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et enfin, de **ravines** lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) et en

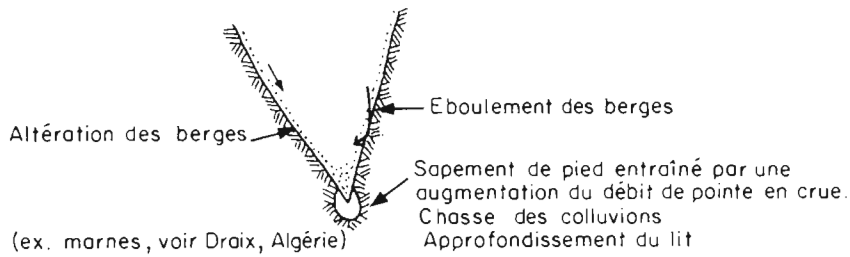
FIGURE 53
Les formes d'érosion linéaire

Trois processus de ravinement

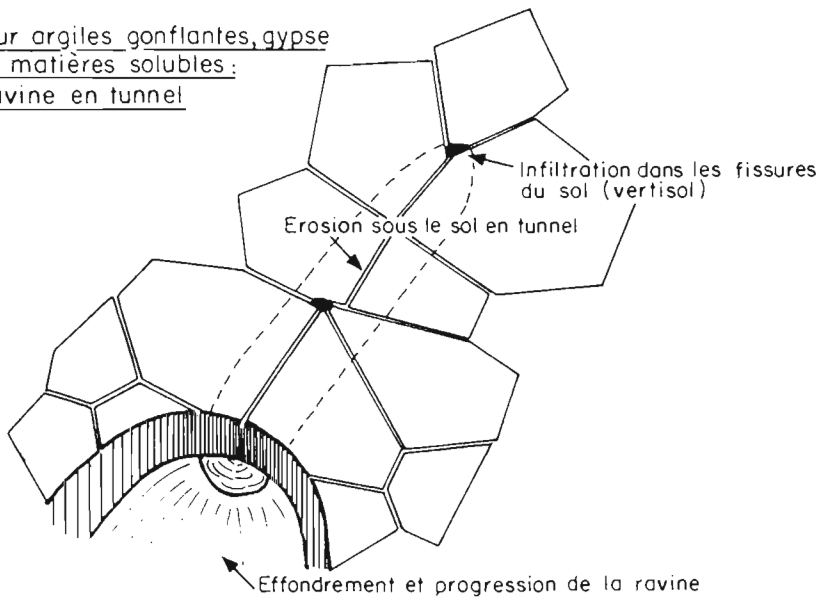
1) Sur matériau hétérogène: ravines en U



2) Sur matériau homogène : flancs de ravine en V



3) Sur argiles gonflantes, gypse et matières solubles: ravine en tunnel



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, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important et 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 cimentés et des méthodes mécaniques coûteuses (Lilin, Koohafkan, 1987 ; Mura, 1990).

Il est également intéressant de noter la forme de ces ravines. Certaines ont des berges **en V** à pente constante jusqu'au fond, d'autres ont des berges verticales et sont **en U**, enfin d'autres ravines évoluent **par tunnel** et effondrement (figure 53). 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 le diagnostic. 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).

LA CAUSE ET LES PROCESSUS DE L'EROSION LINEAIRE

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.

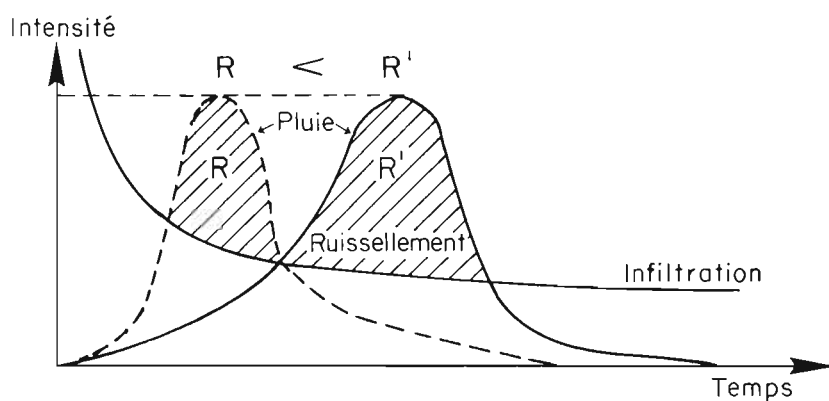
$$E_{\text{Ruiss}} = 1/2 MV^2 \text{ sur parcelle} = 1/2 MGH \text{ sur bassin versant}$$

TROIS THEORIES POUR EXPLIQUER LA NAISSANCE DU RUISSELLEMENT

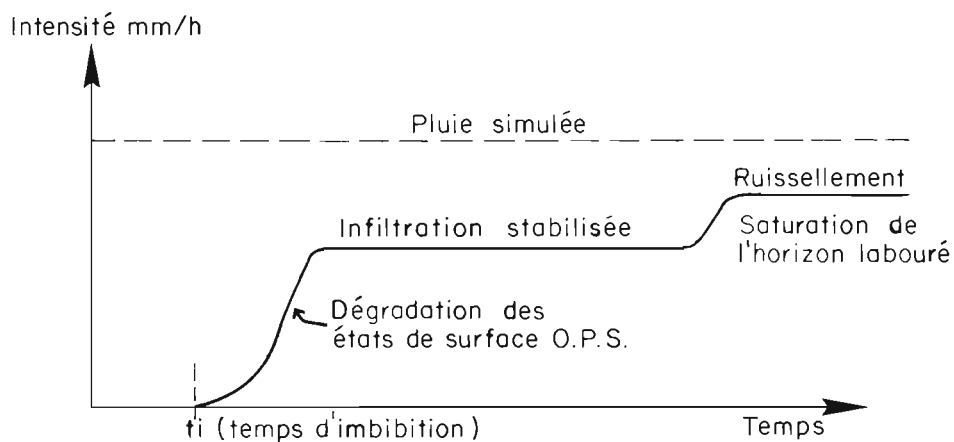
1° **Théorie de Horton (1945)** Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol (figure 54a). Si on compare l'infiltration à l'intensité de la pluie, on constate que l'intensité d'infiltration décroît au cours du temps, d'une part parce que le potentiel capillaire diminue à mesure que le front d'infiltration pénètre 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 (ou plusieurs) 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 sur un bassin versant et l'intensité des pluies. On a donc cherché une autre explication.

FIGURE 54

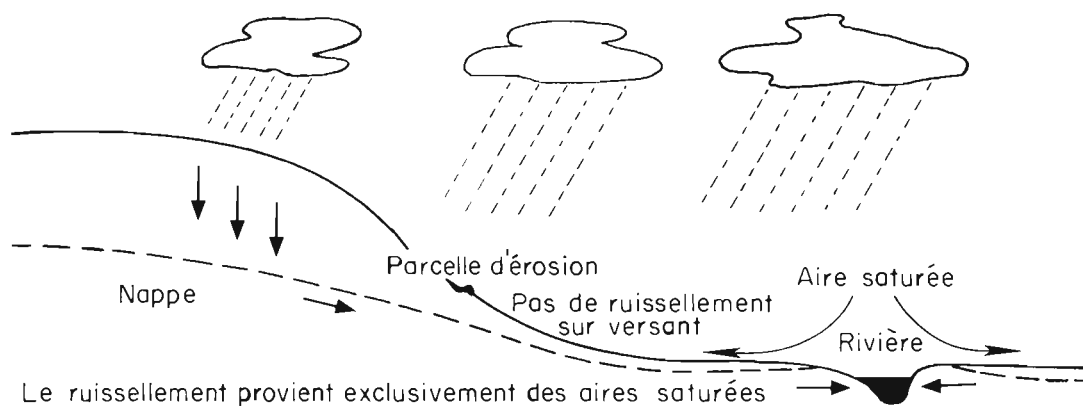
Naissance du ruissellement : trois théories

A Si intensité pluie $>$ Infiltration (Horton)

B Si la porosité du sol est saturée



C Contribution localisée du ruissellement



- 2° **Théorie de la saturation du milieu.** Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé (figure 54b). 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 ; elle 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 54c, 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 le ruissellement sur un bassin versant, on constate que la rivière réagit très rapidement aux orages alors qu'on n'observe pas de ruissellement sur les versants ! Le volume ruisselé 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 en période humide, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume écoulé par la rivière par extension de la surface saturée**, la nappe étant 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 importe d'organiser un certain drainage. La végétation va freiner le ruissellement et le stocker provisoirement : elle va diminuer les pointes de crue et l'énergie disponible pour l'arrachement des matériaux. 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 forme très peu de ruissellement. On comprend, dès lors, les nombreux échecs des projets de LAE qui se contentent d'appliquer des recettes mises au point en régions tempérées, en des situations écologiques très différentes (ex. les fossés de diversion en région soudano-sahélienne).

LE DEVELOPPEMENT 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 l'entaille de la surface du sol et la formation d'une rigole. Celle-ci va évoluer par un frottement du fond par les sédiments transportés par le fluide et 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, argileux, marneux ou schisteux. Les versants de ces ravines évoluent par altération de la roche : en saison froide par alternance de gelées et de soleil, en saison chaude, par alternance de périodes sèches 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. Une à deux averses par an suffisent pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour entailler 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 l'impact 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. 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 le surcreusement du fond de la ravine et à rétablir la pente d'équilibre sur les versants.

Un deuxième type de **ravines en U** s'observe fréquemment dans la nature sur des **matériaux hétérogènes**. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants : lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Soit, la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement creuse alors 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 (sapement de berges). 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. Dans les terrains de grande culture du bassin parisien, on peut aussi trouver des ravines en U emboîtées, développées dans des limons de cohésion croissante depuis le lit de semence, la zone labourée et la semelle de labour dans l'horizon B tassé non travaillé.

Il existe une troisième forme de ravinement encore plus difficile à traiter : **l'érosion en tunnel** (tunneling).

Elle peut se développer sur des pentes faibles, dans un matériau fissuré en surface, soit sur des sols riches en argiles gonflantes (vertisols, sols bruns tropicaux, etc...), soit sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles (fréquent dans le bassin méditerranéen).

Lors des orages de fin de saison sèche, les eaux pénètrent dans ces sols fissurés jusqu'à la roche altérée, ruissellent dans ces fissures jusqu'en bas de pente où elles peuvent former des ravines régressives.

Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines

régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grosses averses. Seul, le labour en sec peut colmater ces fissures et forcer l'eau à mouiller toute la masse de sol sans s'infiltrer préférentiellement dans les mégaporosités.

LES FACTEURS DU RUISSELLEMENT

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 RUISSELE ?

- C'est **tout d'abord la pluie : la hauteur des pluies**, au cas où le ruissellement naît d'un engorgement du sol, ou **l'intensité des pluies en 30 mn** (Wischmeier et Smith (1960), Roose, 1973), qui règle la battance et la naissance du ruissellement, ou sur les fortes pentes des montagnes andines, l'intensité maximale en 15mn (Equateur : De Noni *et al.*, 1988).

Au Zimbabwe, Hudson considère que les pluies n'entraînent pratiquement pas de ruissellement ni d'érosion sur les oxisols très résistants 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 (Casenave et Valentin, 1989 ; 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. Sur des sols limoneux fragiles, l'infiltration diminue lorsque l'intensité des pluies augmente, car il se forme plus vite une croûte de battance très peu perméable (Rahéliarisoa, 1985 ; Boudjemline, 1987).

- **L'humidité du sol préalable à l'averse est le second facteur explicatif du volume ruisselé**

Ce paramètre s'exprime, soit par le déficit de saturation du sol avant l'averse (porosité non gorgée d'eau), soit par le temps en heures qui s'est écoulé avant la pluie, soit par l'indice de Köhler. La pluie d'imbibition est généralement nettement supérieure pour un sol sec que lorsque le sol est humide. On passe souvent d'une pluie d'imbibition de 10 à 40 mm en sol sec, 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 (1976) 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.

- Le troisième point réglant le volume ruisselé est **la surface du bassin versant drainé par le même chenal** (Zimbabwe : Stocking, 1978).

- **L'état de la surface du sol** peut se décomposer en :

- organisation pelliculaire,

- fissuration,
- orifices d'origine biologique,
- rugosité.

La **rugosité** de la surface du sol influence surtout la pluie d'imbibition mais cette influence diminue lorsque la pente augmente car le volume stocké dans les flaques diminue sur les pentes fortes.

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 avoir 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 macropores qui restent ouverts entre les mottes à la surface du sol.

□ L'inclinaison de la pente

Généralement, l'inclinaison de la pente diminue le volume ruisselé car sur forte pente, on observe un meilleur drainage interne et une formation plus lente des pellicules de battance, lesquelles 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, lorsque les sols sont dénudés, que le coefficient de ruissellement diminue lorsque la pente augmente (Roose, 1973 ; Valentin, 1978).

- Les techniques culturales peuvent augmenter de façon considérable l'infiltration. A Pouni, (Burkina Faso) 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 dans le Pas de Calais (France) sur l'effet du **nombre de passages des outils**.
- Soulignons également l'effet de la **mésafaune** à Saria (Burkina Faso). Nous avons mesuré sur 100 cm² l'infiltration finale d'une lame d'eau de 100 mm. L'infiltration était de l'ordre de 5 à 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.

QUELS SONT LES FACTEURS QUI VONT JOUER SUR LA VITESSE DU FLUIDE ?

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 l'épaisseur de la lame ruisselante et 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 %.
- **La position de la parcelle dans la topographie peut aussi avoir un rôle majeur** (Heusch, 1970). En effet les eaux peuvent drainer dans le sol 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 sur des sols homogènes, 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 volumes ruisselés ;
3. de la hauteur de chute en tête de ravine (H). L'équation s'écrit :

$$\text{Erosion par ravinement} = 6.87 \times 10^{-3} P^{1.34} \times S^1 \times H^{0.52}$$

- **L'influence du couvert végétal sur l'érosion linéaire est complexe**
 - 1° Le couvert végétal, d'une part protège contre la battance des pluies, donc prolonge la perméabilité du sol et réduit le volume ruisselé.
 - 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 par m². 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.
- **Le sol, enfin, intervient à différents niveaux**

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 (Poesen, 1990 ; Valentin et Figueroa, 1987). Si 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. **Si les sols sont tassés**, ils seront moins perméables mais **plus cohérents** et par conséquent ils résisteront mieux aux courants de ruissellement. Enfin, si le **profil**

du sol est homogène, l'érosion va donner une ravine en V ; si au contraire, sa **résistance est hétérogène**, le profil va évoluer en U avec des faces verticales, la vitesse de l'érosion étant fonction de la résistance du matériau à l'entaille.

En 1935, Hjulström a étudié l'érodibilité des matériaux terreux en fonction de leur texture et de la vitesse des écoulements dans des canaux. Dans un graphique (fig. 5.6) figurant la vitesse des écoulements en fonction de la taille des particules, Hjulström a montré qu'il existait trois zones : la zone supérieure **d'érosion**, passant par un minimum vers 100 microns, la zone inférieure de sédimentation, et entre les 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 celui des sables grossiers et les cailloux et la cohésion est plus faible que celle des limons et des 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 (Wischmeier, Johnson et Cross, 1971). 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 sur la largeur concernée par les chemins d'eau.

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.

LA LUTTE CONTRE LE RUISSellement ET L'EROSION LINEAIRE

Elle consiste à réduire la vitesse du ruissellement et progressivement son volume.

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 technique 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.

DANS LES VALLEES SECHES

Dans les vallées sèches, les petites ravines et les fonds de vallées drainées, il suffit bien souvent de ne pas cultiver le terrain ou 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, plus coûteuse, 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, chapitre 15).

LA FIXATION BIOLOGIQUE DES PETITES RAVINES (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 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 : arbres à pain, manguiers, cocotiers et bananiers ; en Algérie, poiriers, pommiers, abricotiers, noyers, ou peupliers, frênes, etc...) 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 matériel végétal vivant. Cet aménagement s'inspire de la technique des haies vives constituées de grandes boutures rapprochées, utilisées 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'affouillement. 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'affouillement et à la submersion, vitesse de croissance élevée. En Haïti, on peut faire usage de l'*Euphorbia lactea*, divers sisals, *Bromelia*, *Glyciridia sepium*, *Yucca*, *Bambusa vulgaris*, Goyavier, *Jatropha curcas*, *Cassia* et *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 les eaux vives, lors des plus fortes crues, arrachent 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 du soleil. 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 de hauteur à la cuvette doit suffire, mais ils devront avoir une forme en V, concentrant l'écoulement dans l'axe de la ravine.

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 est, par la mise en place de branchages,
- prévention de l'affouillement à l'aval en limitant la hauteur de l'ouvrage et en installant certaines espèces à son pied : agaves et espèces fourragères à fort développement.

Généralement, cet entretien ne peut être assuré par les agents de l'Etat. **Les paysans 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 ne pose pas de problème 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."

LES GROSSES RAVINES TORRENTIELLES (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, mais de limiter l'approfondissement de la ravine.

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", soit à l'objectif de "protection contre les laves torrentielles des lieux habités".

Les principes généraux de l'aménagement des grosses ravines sont les suivants :

- 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.
- 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.
- 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 recherchée des ouvrages.

Lorsque l'écartement entre les ouvrages est trop important, la base d'un barrage est affouillée, 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'affouillement 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 durables (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 des berges instables, renversement sous la pression de l'eau, affouillement, 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'écrêtement d'une grosse ravine n'est justifié que dans le cas où cette ravine menace des intérêts 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."

LE TRAITEMENT DES RAVINES MOYENNES PAR GENIE MECANIQUE ET BIOLOGIQUE (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.

L'ensemble des principes nécessaires pour l'aménagement des ravines moyennes est présenté dans l'encart "dix commandements pour l'aménagement 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, et les seuils en gabion encore trop chers, par des seuils en grillage métallique 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 sur les flancs de la ravine permet de recentrer les écoulements. D'autre part, dès qu'un volume suffisant de terre est rassemblé, on peut planter en bordure de la ravine, des grands arbres produisant du fourrage, des fruits ou du bois noble qui vont stabiliser les versants. Sur les flancs des ravines, il sera souhaitable de rechercher les espèces les mieux adaptées et les plus productives. En bordure de ravine, une ligne d'arbres peut aussi servir à isoler 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 à la maintenance de ce système de fixation et de correction des ravines et valoriser, par la même occasion, la production de fourrage, de fruits et de bois.

En Algérie par exemple, 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 (figure 55). 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 cent à cinq cent mille francs français et qu'il existe des dizaines de milliers de ravines à aménager, des études sont actuellement en cours pour réduire le coût de ces aménagements et d'autre part, pour chercher à valoriser ces aménagements (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.

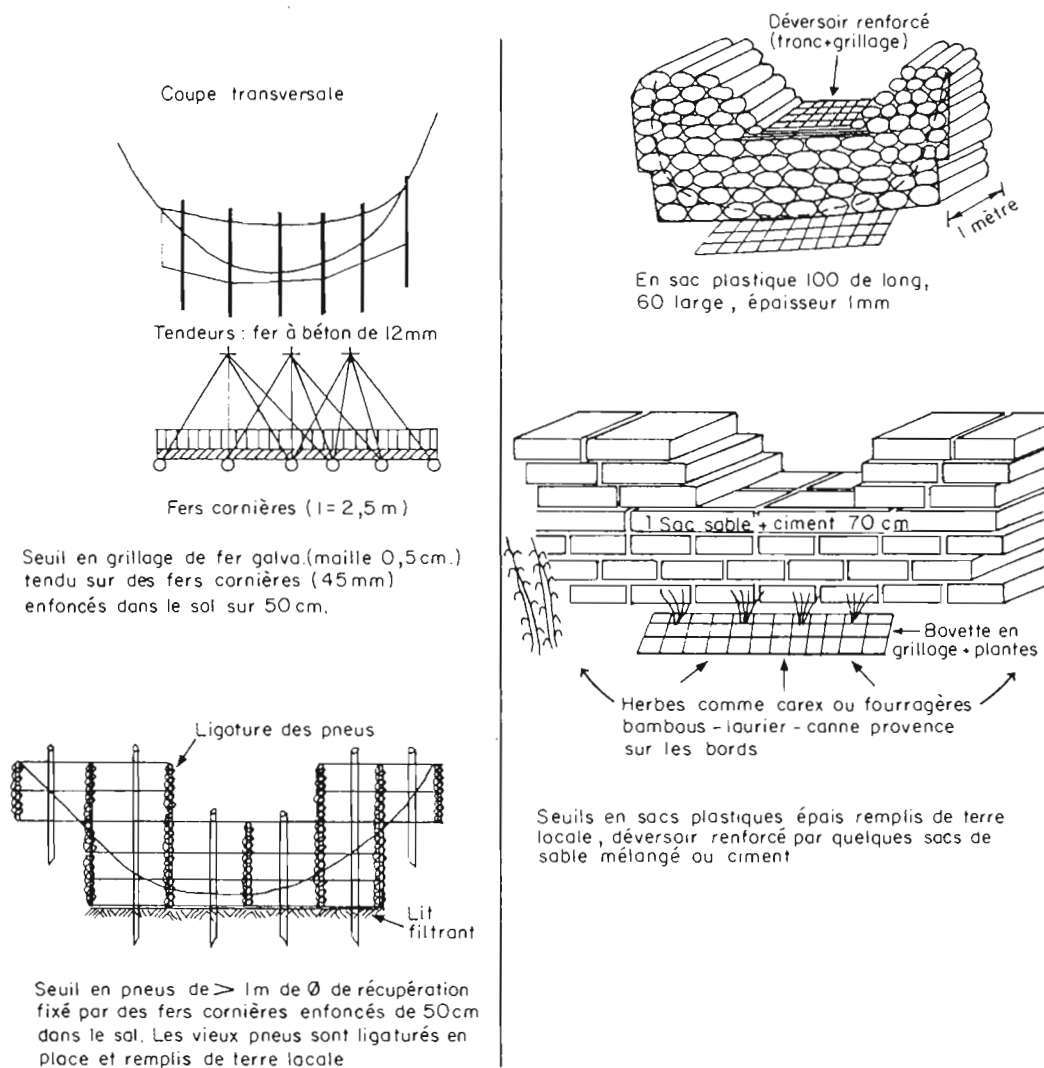
VALORISATION DES AMENAGEMENTS DE RAVINE [planches photographiques 14 et 15]

Le coût de la correction torrentielle et de l'aménagement des ravines est très élevé (environ 100 000 à 500 000 FF/Km) : il ne se justifie que s'il existe en aval des barrages, des logements, des routes ou des ouvrages importants à protéger.

Mieux vaut prévenir que guérir et ne pas attendre que les sols soient profondément dégradés pour tenter de réduire le ruissellement et l'érosion dès qu'ils se forment sur les champs - en mettant au point des systèmes de production couvrant bien le sol.

FIGURE 55

Différents types de seuils perméables peu coûteux souples, faciles à monter avec des matériaux produits localement



Prix pour seuil de 4 m³
(matériel + main d'oeuvre + transport)
à 90 dinars par jour

2200 dinars

en gabion

en pierres sèches

en grillage de fer

34 %

en toile brise-vent plastique

21 %

en pneus récupérés

20 %

en sacs plastique

(± 15 %)

en France = 500 FF/m³ de gabion

1 dinar = 0,25 FF en juin 1992

Cependant, les ravines, petites et moyennes, peuvent être traitées avec des seuils simplifiés, peu coûteux (20 % du prix des gabions), utilisant des matériaux non sophistiqués et une main d'œuvre paysanne rapidement formée (figure 55).

L'originalité de la démarche, c'est, non seulement de bloquer l'érosion linéaire qui creuse les ravines, de stocker quelques dizaines de m³ de sédiments derrière les petits seuils, mais c'est surtout de valoriser l'eau stockée entre les sédiments captés derrière les seuils en produisant des fourrages verts en saison sèche et des arbres qui peuvent motiver les paysans à gérer correctement leurs terres et les ravines. C'est la condition essentielle pour passer d'un stade où l'Etat s'occupe de tout, à une étape où l'Etat favorise l'initiative paysanne indispensable pour le maintien de l'environnement rural.

Le stade ultérieur consiste à aménager d'abord les ravines secondaires avant de construire de petits barrages collinaires susceptibles d'alimenter en eau les paysans qui entretiennent les montagnes et qui manquent cruellement d'eau pour abreuver le bétail et irriguer un petit jardin à haute productivité.

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 confluents 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 ± cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force d'arrachement 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.

Les ravines peuvent devenir des "oasis linéaires".

Chapitre 7

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. Nous ne présenterons ici que les principes généraux de prévention et de lutte contre les mouvements de masse à portée des paysans. Nous pensons que seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.

Nous prions le lecteur de consulter les ouvrages du Cemagref (1984-85) et les références en annexe (en particulier Heusch, 1988) pour obtenir des informations plus spécialisées qui échappent au cadre de cet ouvrage sur la GCES.

LES FORMES D'EROSION EN MASSE [planche photographique 12]

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en six groupes principaux (figure 56) :

□ **Les glissements lents (creep)**

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de 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 (Moeyersons, 1989).

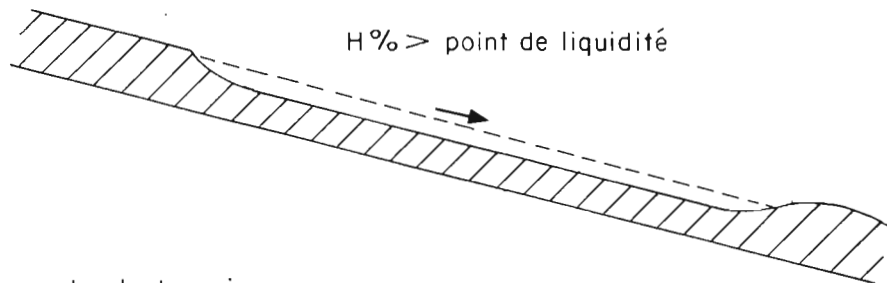
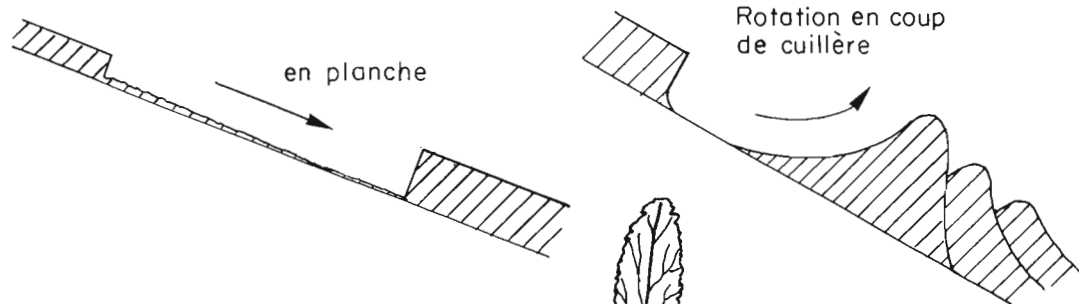
Une autre forme de creep, causée par les techniques culturales, a été traitée à part : c'est l'érosion mécanique sèche. L'ensemble de ces processus aboutissent, comme l'érosion en nappes et rigoles, au décapage des sommets de collines et à l'empâtement des bas de pentes.

□ **Les glissements rapides**

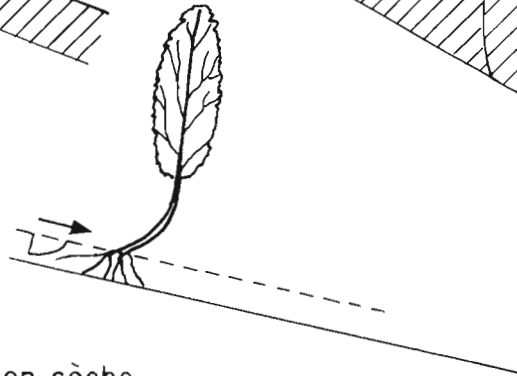
Les glissements de terrain **en planches** sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le

FIGURE 56

Différentes formes d'érosion en masse

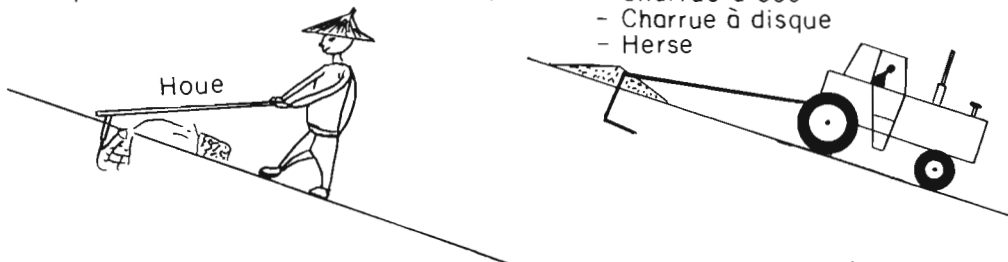
GLISSEMENTS RAPIDES1) Coulées boueuses2) Glissements de terrainMOUVEMENTS LENTS3) Creep

(Glissement lent des particules à la surface du sol sur pentes fortes)

4) Erosion mécanique ou érosion sèche

(Descente progressive des terres poussés par les outils de travail du sol)

- Charrue à soc
- Charrue à disque
- Herse



pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération.

□ **Les versants moutonnés**

Formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque 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 imperméable que représente l'altérite des marnes ou des argilites par exemple.

□ **Les coulées boueuses (lave torrentielle)**

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 (cône de déjection). Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Temple, Rapp, 1972).

□ **Les glissements rotationnels en "coups de cuillère" (figure 57)**

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 un aspect moutonné. Au creux du coup de cuillère, on observe généralement une zone humide où croît une végétation adaptée à l'hydromorphie (*Carex*). Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepenne et ce ravinement fait progressivement disparaître la contrepenne, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement ordinaire.

□ **Les formes locales**

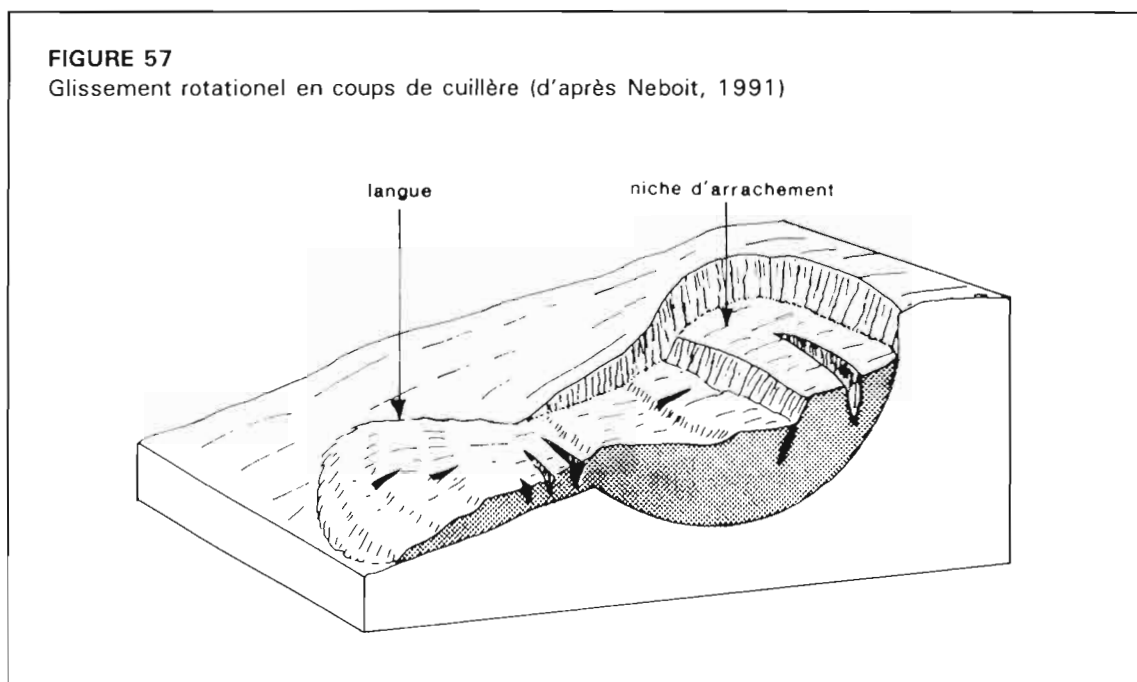
Il s'agit d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine : ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre.

LES CAUSES ET LES PROCESSUS DES MOUVEMENTS DE MASSE

La cause des mouvements de masse (lents ou rapides) est à rechercher dans le déséquilibre entre d'une part, la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle de roche altérée en pente sur lequel ils reposent (pente limites de 30 à 40 degrés =

FIGURE 57

Glissement rotationnel en coups de cuillère (d'après Neboit, 1991)



65 %). Ce déséquilibre peut se manifester progressivement sur un ou plusieurs plans de glissement suite à l'humectation de ce(s) plan(s) ou par dépassement dans la couverture pédologique du point d'élasticité (creeping avec déformations sans rupture) ou de liquidité (coulées boueuses).

Le déséquilibre est le plus souvent brutal et associé à deux types d'évènements isolés ou combinés : les secousses sismiques et les averses orageuses abondantes et intenses (plus de 75 mm en 2-3 heures) (Temple et Rapp, 1972). La circulation rapide de l'eau dans les fissures ou des mégapores (tunnelling) jusqu'à la roche pourrie provoquerait, à une certaine distance de la ligne de crête (5 à 95 mètres à Mgéta, en Tanzanie) ou aux points de rencontre des filets d'eau dans le sol, une pression hydrostatique capable de repousser la masse réorganisée des sols, de décoller celui-ci par rapport à un niveau de fragilité de la roche pourrie : d'où la fréquence élevée des glissements en planche sur les schistes, les gneiss et les matériaux volcaniques poreux déposés sur les roches imperméables (ex. les cendres volcaniques sur dômes granitiques au Rwanda).

Les facteurs qui favorisent ce déséquilibre sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux (présence de limons issus de l'altération des micas), des roches présentant des plans de clivage ou de fracture préférentiels (argillites, marnes, schistes, roches micassées, gneiss). L'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements de masse en modifiant la géométrie externe du versant (par terrassement, creusement d'un talus pour installer une route ou des habitations, surcharge d'un versant par des remblais, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est modifié, etc). La végétation intervient également. Temple et Rapp (1972) ont montré dans leur étude sur un milieu de glissements de terrain (debris-slide et mudflow) que

47 % des entailles sont situées sur des champs cultivés (maïs + mil + haricots), 47 % sur des jachères et des pâturages et moins de 1 % dans les zones forestières les plus humides. Même les arbres isolés semblent avoir un effet puisque seules les pistes non plantées d'arbres montrent des traces de glissement de terrain : une rangée d'arbres suffirait pour éviter ces processus. Cependant, quelques gros glissements ont eu lieu dans la zone forestière la plus humide ($P \approx 2000$ mm) qui a reçu 185 mm en 72 heures le 23 février 1970. La reforestation n'est donc pas une arme absolue contre les glissements de terrain et le type d'arbres (de forêt) n'est probablement pas indifférent. Les formes convexes des versants, altération en demi-orange, et les vallées profondément entaillées sont aussi des facteurs favorables aux glissements de terrain (Temple et Rapp, 1972 ; Avenard, 1989 ; Moyersons, 1989).

LES FACTEURS DE RISQUE DE GLISSEMENT DE TERRAIN

D'après Ferry (1987), 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 intersticielle dans le sol,
F l'angle de frottement interne,
tangente de F, le coefficient de frottement.

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 creep est souvent observé lorsque la couverture pédologique est épaisse, la pente forte et le climat très humide. Les glissements de terrain en planche sont favorisés par la présence de gneiss, de schistes ou de cendres volcaniques projetées sur les pentes convexes de schiste ou de granit en cas de pendage dans le sens de la pente, lorsque la couverture pédologique n'est pas très profonde, sur des fortes pentes (> 60 %) ou encore lorsqu'il existe un niveau imperméable ou un plan de contact en forte pente excessivement lubrifié.

Les versants en bourrelets ou moutonnés sont généralement liés à des milieux humides et marneux, de même que les glissements de terrain rotationnels. Les sapements de berges et ceux de têtes ou de flancs de ravines, sont généralement liés à la présence d'écoulements qui creusent sous la couverture pédologique jusqu'à l'éboulement du matériau. On peut observer également des effondrements de tunnels provenant de la dissolution de gypse ou de sel ou creusés par des rongeurs à l'intérieur de la couverture pédologique dans lesquels les eaux vont s'engouffrer. Les sapements de berges sont fréquents dans les courbures des rivières et lors de la formation de méandres.

LA LUTTE CONTRE LES MOUVEMENTS DE MASSE

Les méthodes de lutte contre les mouvements de masse sont généralement coûteuses et délicates. Contrairement à la lutte contre l'érosion en nappe ou l'érosion linéaire, il s'agit

bien souvent **d'éviter que les eaux de pluie ne s'infiltrent dans le sol**, n'alourdissent la couverture pédologique et n'atteignent rapidement le plan de glissement. Pour ce faire, on draine le sol en surface pour évacuer le ruissellement vers des zones non dangereuses, généralement les zones convexes d'un versant. 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 ; par exemple, en plantant des eucalyptus ou d'autres plantes qui ont un pouvoir évaporant important. Il faut cependant éviter que ce végétal n'atteigne des poids trop 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 conserver 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 des arbres 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 jusqu'au plan de glissement. Il faut 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. 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 une forte augmentation de l'humidité du sol.

Les méthodes préventives sont les plus importantes. Il faut donc éviter d'installer des infrastructures sur les versants instables, mais si on ne peut faire autrement, il convient de limiter les déblais et remblais qui déséquilibrent les versants. Si l'on est obligé de creuser le versant pour un passage routier par exemple, il faut conforter le talus en augmentant la butée par un masque en enrochement ou un mur de soutènement qui s'oppose au couple de rotation du glissement et améliore le drainage du versant.

Un fossé, à l'amont des routes, doit intercepter les eaux de ruissellement du versant pour les empêcher de s'infiltrer dans les fissures de traction dans la couverture pédologique en amont des déblais. Des drains au niveau de l'altérite de 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 plan de glissement et améliorent l'évaporation de la masse d'eau (Rwanda : Moeyersons, 1989). Lorsqu'on crée 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 sur les talus amont et aval où d'y installer de l'herbe

qu'il ne faut surtout pas arracher. On peut aussi installer en amont un mur drainé dont les fondations sont bien ancrées dans la roche. Enfin, en montagne, s'il existe un versant rocheux très pentu, il est possible de jeter un filet en grillage de fil de fer pour amortir la chute des pierres.

En Tanzanie, Temple et Rapp (1972) ont montré que les glissements de terrain en planche sont peu fréquents (1 %) en zone forestière et que même la présence d'arbres isolés peut réduire l'importance de ce processus, en particulier le long des routes. La reforestation n'est cependant pas une arme absolue ni même une méthode généralisable dans les zones de moyenne montagne (comme Mgéta) où la population est dense (170 à 510 habitants par km²) et a besoin de ces terres riches et bien arrosées pour vivre (cultures vivrières et légumes exportés vers les villes). Tout au plus, peut-on préconiser d'associer aux plantes annuelles cultivées sur les petites "terrasses escaliers" (un mètre de largeur) des rangées d'arbres sur les crêtes (eucalyptus), sur les talus en bordure des champs (fruitiers) et le long des rivières (bambous, eucalyptus ou autres essences locales) (Rwehumbiza et Roose, 1992).

Au Rwanda, on peut observer que les zones de glissement de terrain situées sur des pentes de plus de 45 % sont souvent plantées en eucalyptus et abandonnées au pâturage. Les habitations sont construites sur un replat creusé dans une zone convexe des versants stables et une double rangée d'eucalyptus dessèchent l'assiette des pistes principales.

CONCLUSION

La lutte contre l'érosion en masse doit avant tout être préventive : cartographie des zones dangereuses, plan d'occupation des sols interdisant toute construction et modification du versant, zone forestière de protection à gestion sous forme de taillis. Cependant, il n'est pas toujours possible d'éviter les cultures sur ces zones fragiles montagneuses souvent plus peuplées que les plaines environnantes car le climat y est plus sain (pas de paludisme) et les terres mieux arrosées.

La lutte contre les glissements de terrain est une affaire de spécialistes qui réclame de gros moyens pour drainer les plans de glissement hors de portée des paysans. Ces investissements de l'Etat ne se justifient que pour protéger des aménagements vitaux : réseaux routiers, villages, barrages, etc... Mais il existe quelques recettes que les paysans implantés depuis longtemps dans la région connaissent bien : il s'agit d'utiliser des arbres - en particulier l'eucalyptus et les bambous - pour dessécher l'assiette des talus et stabiliser les mouvements lents de la couverture pédologique sur les versants pentus et le long des berges. En jouant sur le choix des espèces, on devrait pouvoir transformer ces paysages habités en un bocage stable comme dans le pays Bamiléké (voir chapitre 10).

Enfin, avant de se lancer dans la lutte antiérosive, il faut bien considérer les risques liés aux différents processus d'érosion en chaque zone. En effet, la lutte contre l'érosion en nappe (qui tend à améliorer l'infiltration) et le creusement de fossés de diversion sur les versants de plus de 25 % de pente (qui drainent les horizons superficiels, mais risquent de raccourcir le cheminement de l'eau jusqu'aux plans de glissement) sont souvent à l'origine d'énormes glissements de terrain encore plus catastrophiques. En Tanzanie, Temple et Rapp rapportent qu'à la suite d'une seule averse de 100 à 186 mm en trois jours (23-25 février 1973), les

dégâts d'un millier de glissements de terrain furent estimés globalement à 500 000 FF, à six morts, neuf maisons détruites, 20 chèvres noyées, 500 ha de cultures anéantis ; 14 % des exploitations ont perdu leurs récoltes, les routes furent coupées pendant six semaines par des inondations, etc...

Chapitre 8

L'érosion éolienne

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 superficiels secs.

LES PROCESSUS [planche photographique 16]

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm).

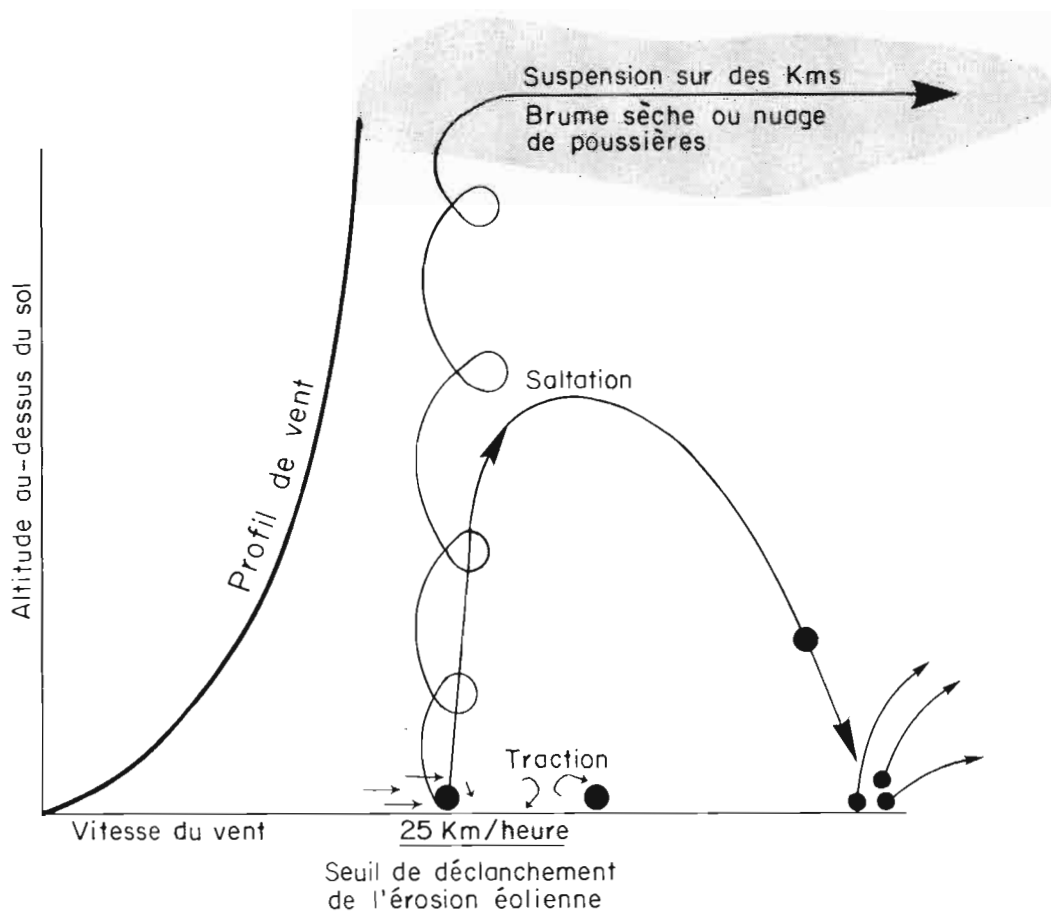
De plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1988).

Sur le terrain, on peut observer les trois processus suivants lorsque la vitesse du vent dépasse 15 à 25 km/heure (ou 4 à 7 m/sec.) selon la turbulence de l'air (De Ploey, 1980 ; Mainguet, 1983 ; Heusch, 1988) (figure 58).

- **La saltation** de sables fins (0,1 à 0,5 mm) : ce sont les nappes de sable soulevées par vent violent qui circulent sur plusieurs dizaines de mètres sur des surfaces lisses et laissent au sol des nappes de sables ridées (ripplemarks) ou des petites buttes de sable piégées dans les touffes de végétation. Ce sont ces nappes de sable qui flagellent les rochers dans les zones désertiques et leur donnent une forme caractéristique de champignon (corrasion). Elles provoquent de gros dégâts sur les végétaux.
- **La déflation** entraîne le départ en suspension des particules légères du sol (argiles, limons et matières organiques). Ces poussières sont aspirées par les tourbillons jusqu'à plusieurs milliers de mètres d'altitude pour être ensuite dispersées sous forme de brume sèche ou pour circuler sous forme de nuage sur plusieurs milliers de kilomètres. Ce sont les limons éolisés, arrachés aux steppes périglaciaires qui ont formé les loess ; ce sont

FIGURE 58

Trois processus d'érosion éolienne : suspension, saltation, traction



sol sec, peu cohéent

1. Suspension : nuage de limons impalpables (ex. poussières en saison sèche = dust bowl)
circulation jusqu'à 10 km d'altitude sur des centaines de km de distance
2. Saltation : grains de sable fin $\phi \approx 100$ 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

les poussières du Sahara qui se déposent à Montpellier trois fois l'an et à Paris une à deux fois par an.

- **La reptation.** Les grains de sable (0,5 à 2 mm), trop lourds pour être aspirés en altitude, sont déséquilibrés par les bourrasques du vent, roulés et traînés à la surface du sol jusqu'en haut des dunes qui progressent ainsi de quelques mètres par heure de vent violent.

LES FORMES DES EDIFICES EOLIENS

La forme des dunes dépend des vents dominants.

Si les vents dominants sont monodirectionnels, les dunes peuvent être **linéaires**, parallèles à la côte (érigées par les vents qui balayent la plage à marée basse), ou en croissant (barkhane), la partie au vent est en pente douce. Les grains de sable sont poussés par le vent jusqu'au sommet de la pente douce et tombent ensuite sur la pente raide à l'intérieur du cercle. La vitesse de progression décroît lorsque la taille des édifices croît. D'après les études de Bourgoïn et Coursin (1956), le long du tracé de la voie ferrée de Mauritanie (Snim), les dunes de 3 m de haut avanceraient de 40 à 80 mètres par an, les dunes de 12 mètres avanceraient de 12 à 35 mètres et celles de 24 mètres de haut, de 8 à 17 mètres.

Pour éviter l'ensablement des voies de communication, on évite de passer dans les zones de dunes vives, on crée un remblai de 50 cm avec une pente très douce (1/5 à 1/10) afin que le vent accélère au franchissement de la route et empêche le dépôt de sable : pour accélérer encore le vent, on dispose quelquefois aux endroits délicats, des panneaux déflecteurs de 3 x 1 m inclinés à 60° ou encore des buttes de sable à section triangulaire à huit mètres de la route dont on coiffe la crête et les flancs d'une couche de 20 à 50 cm de cailloux.

Si les vents dominants sont pluridirectionnels, on peut trouver des dunes sableuses allongées parfois sur plusieurs centaines de kilomètres ; tangent au sillage d'un obstacle, le **Silk** est oblique par rapport au vent résultant annuel. Au cours des tempêtes, le sable migre le long de la dune, parallèlement à l'édifice qui s'allonge selon sa propre direction (Mainguet, 1983). Le profil est formé par deux versants de sable bouillant en forte pente, se recoupant en une crête vive.

On peut aussi trouver des dunes pyramidales (ghourd) du sommet desquels s'échappent plusieurs crêtes témoignant de vents multidirectionnels.

Il existe aussi des formes en creux, sortes de couloirs entre deux dunes où le vent s'engouffre et creuse des "yardang". Les nappes de sable ainsi déplacées entre les dunes vont être piégées par des touffes de végétaux. Elles 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 terres basaltiques du Nicaragua) ou encore les limons dans la Grande Plaine américaine).

LES EFFETS DE L'ÉROSION ÉOLIENNE

- Le premier effet est le vannage des particules légères. L'érosion éolienne est très sélective. Elle exporte 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. L'accumulation de ces limons arrachés par le vent dans les steppes périglaciaires a donné naissance aux loess, terres fertiles qui couvrent de larges espaces en Europe et en Amérique du Nord où s'est développé une agriculture très performante.
- Les formes les plus spectaculaires sont les dunes, accumulation de sables plus ou moins stériles qui migrent au gré des vents au point d'ensevelir les oasis et les cités anciennes.
- 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 (abrasion).
- Les nappes de sable qui circulent à faible altitude (30 à 50 m) peuvent dégrader les végétaux (en particulier les jeunes semis de mil ou de coton dans les zones semi-arides). 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.

LES FACTEURS MODIFIANT L'IMPORTANCE DE L'ÉROSION ÉOLIENNE

- **L'aridité du climat.** Bien que l'érosion éolienne puisse avoir lieu également dans des climats humides lorsque 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 plages de sol dénudé.

Il faut aussi que la vitesse du vent dépasse un seuil de l'ordre de 20 km/h ou de 6 m/s sur sols secs. 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.

- **La texture des sols.** Les sols les plus fragiles sont limonosableux, donc riches en particules comprises entre 10 et 100 microns (Bagnold, 1937). 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 résistent également mieux, les particules étant trop lourdes pour être déplacées par l'érosion éolienne. L'optimum pour l'érosion éolienne se situe autour de 80 microns.
- **La structure des sols.** Moins les sols comportent en surface de matières qui améliorent la structure (matières organiques, fer et alumine libre, calcaire), et plus ces sols sont fragiles. Par contre, la présence de sodium ou de sel entraîne souvent la formation d'une couche pulvérulente en surface, ce qui favorise l'érosion éolienne.
- **L'état de la surface des sols.** La pierrosité à la surface du sol, en formant un "pavage", 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.

- **La végétation.** Les chaumes et les résidus de culture fichés dans le sol réduisent la vitesse du vent au ras du sol.
- **Enfin, l'humidité du sol** augmente la cohésion des sables et des limons, rendant ceux-ci temporairement indisponibles pour l'érosion éolienne.

LA LUTTE CONTRE L'ÉROSION ÉOLIENNE

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux ; d'une part réduire la vitesse du vent à la surface du sol, et d'autre part, augmenter la cohésion du matériau face à cette agression.

AUGMENTER LA COHESION DU MATERIAU

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).

Là où on dispose d'eau, l'irrigation d'appoint peut être une méthode efficace et rentable 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.

AUGMENTER LA RUGOSITE 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.

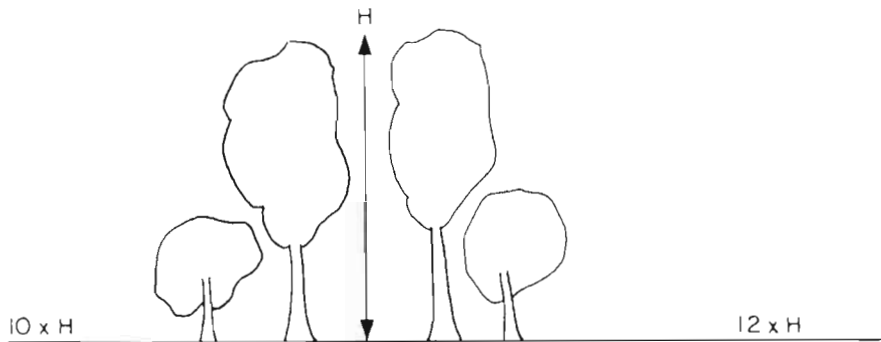
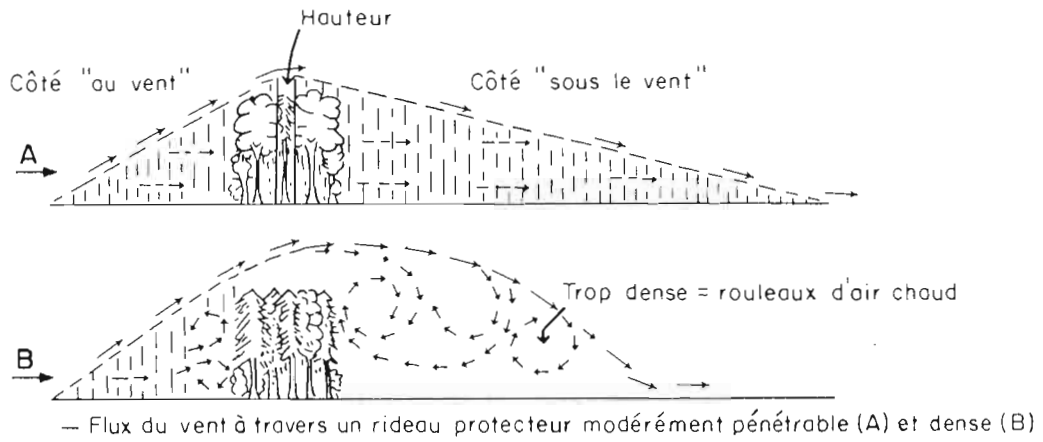
Une autre méthode de lutte très efficace consiste à laisser les résidus de cultures sur le champ. On constate, par exemple, au Burkina Faso, que les tiges de mil et de sorgho, lorsqu'elles sont coupées à 1 m et sont laissées verticales à la surface du sol, piègent un volume important de poussières mais également les feuilles d'arbres qui sont soufflées par les vents à l'époque des tornades.

AUGMENTER LE COUVERT VÉGÉTAL

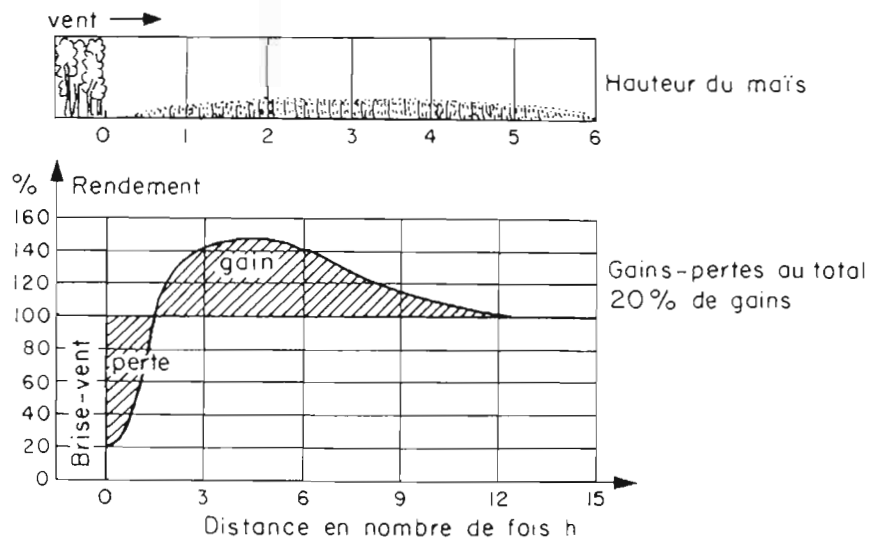
On peut également réduire la vitesse du vent en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride, aussi est-il particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de

FIGURE 59

a. Influence d'un brise-vent sur le vent (d'après Combeau, 1977)



b. Influence d'un brise-vent sur la production en grain d'une céréale (d'après Guyot, 1963)



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 de 25 à 40 arbres à l'hectare très âgés qu'il faudrait rapidement 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 (plantation 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 59b) exploitée par moitié alternativement. La zone cultivée entre les brise-vent 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 haut pour que les jeunes repousses ne soient pas détruites par le bétail.

Les essences arborées les plus courantes en Afrique sont les eucalyptus, *casuarina*, *neem*, divers acacia, le tamaris et le cyprés, 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 local après une paroi de roseaux, 72 % après un brise-vent épais de 20 mètres et 83 % après une bande forestière de 600 m de large (Combeau, 1977).

Au Niger, Renard et Vandembeldt (1991) 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-vent 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 59).

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 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). 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 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 mm). 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 une série de plantes herbacées ou arbustives qui vont reformer la couverture végétale et fixer définitivement la dune (voir les listes de végétaux qui ont été sélectionnés dans les différentes régions du globe).

Une autre méthode, peu coûteuse et bien adaptée à l'Afrique de l'Ouest, 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 France, la fixation des dunes côtières a commencé dès le 16ème siècle : la ville de Bayonne fit semer une plante arénophile, puis reboiser en Pin maritime les dunes vives de Cap Breton. En 1786, Brémontier, ingénieur des Travaux Publics, commence près d'Arcachon les travaux de fixation des Landes : il fait étendre des branches de genêts sur le sable et semer du pin. Devant le succès de ces essais, les travaux seront poursuivis jusqu'en 1876 (80 000 ha) et coûteront 9.6 millions de "francs or" plus 3,5 millions pour la création et l'entretien d'une dune littorale protectrice qui réduit la vitesse du vent et permet aux pins de se développer.

Cette dune protectrice, créée à 50 mètres en arrière des laisses de marée haute, comporte un talus face aux vents d'ouest, planté d'*Ammophila arenaria* de 20 % de pente, puis un plateau avec, dans son axe, une palissade tressée sur piquets et enfin, un talus de sable croûlant. Quand la palissade est sur le point d'être couronnée par les dépôts, on l'exhausse avec une chèvre... jusqu'à ce que la dune atteigne dix mètres (en 10 ± 2 ans). En arrière et sur les côtés, des clayonnages délimitent le périmètre à fixer. Puis, à l'intérieur, on sème à la volée et on couvre le sol de branches de pin, ajonc, bruyère ou genêt, le gros bout des branches étant enfoncé dans le sol face au vent en les imbriquant comme les tuiles d'un toit.

Pour un hectare, il faut compter 25 kg de graines de pins, 15 kg de graines de genêts, plus ajonc et Ammophile, 120 000 fagots de 15 kg et 120 journées de travail auxquels il faut ajouter les frais de création de palissade (Heusch, 1988 : p. 184).

CONCLUSION

Il est intéressant de remarquer les similitudes existant entre l'érosion éolienne et l'érosion hydrique en nappe : les processus, les effets sur le sol, les facteurs et les méthodes de lutte, sont similaires. Une équation de prévision de l'érosion éolienne a d'ailleurs été définie, très voisine de l'USLE. L'érosion éolienne ne devient importante que lorsque le vent se charge de grains de sable qui bombardent la surface dénudée du sol ; l'érosion en nappe se manifeste lors de la battance des gouttes de pluie sur le sol nu. Les deux formes d'érosion entraînent sélectivement les particules fines de la surface du sol et sont anéanties par le paillage du sol ou par une couverture végétale suffisante : ces deux processus aboutissent à l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels ou à son décapage dans les cas les plus violents. Les facteurs sur lesquels on peut jouer sont la couverture du sol, des barrages perméables laissant filtrer lentement le fluide (eau ou vent) et l'amélioration de la structure, de la cohésion et de la rugosité de l'horizon cultivé. Les méthodes de lutte sont donc très voisines : haies vives, brise-vent, gestion des résidus de culture à la surface du sol et couverture végétale dense, labour grossier et buttage ou billonnage cloisonné, réduction de la longueur du champ exposée aux vents dominants ou au ruissellement, amendements organiques ou minéraux (calcaire ou gypse), etc. C'est pourquoi nous nous sommes restreint aux principes généraux et renvoyons les lecteurs aux nombreux manuels qui détaillent les espèces végétales adaptées aux conditions d'aridité locales.



Sarclage à la houe Manga : station de Saria, Burkina Faso. La houe Manga permet de travailler superficiellement la terre après les premières pluies pour détruire à la fois la croûte de battance et les jeunes semis des adventices. Plus tard, une légère modification permet de sarcler et butter les cultures à large espacement (céréales, arachides, coton...) [photo Dugué].



Billonnage cloisonné à Puni, Burkina Faso. Sur une pente faible, le billonnage cloisonné permet de stocker environ 50 mm de pluie et d'améliorer d'autant l'infiltration. Il permet en zone soudano-sahélienne d'améliorer l'économie en eau des plantes en année déficitaire ; en année humide par contre, les cultures risquent de souffrir d'engorgement et de produire moins que le témoin. Cette technique culturale entraîne à long terme l'appauvrissement de l'horizon superficiel en particules fines (argile, limon et matières organiques).



Buttage avec enfouissement des matières organiques : Salagnac, Haïti. Après une courte jachère, le paysan racle d'abord la biomasse pour la faire sécher, puis la rassemble sur une ligne et l'enfouit sous une épaisse butte de terre pour former un cordon isohypse. Les pierres sont entassées sur la bordure la plus proche du champ.



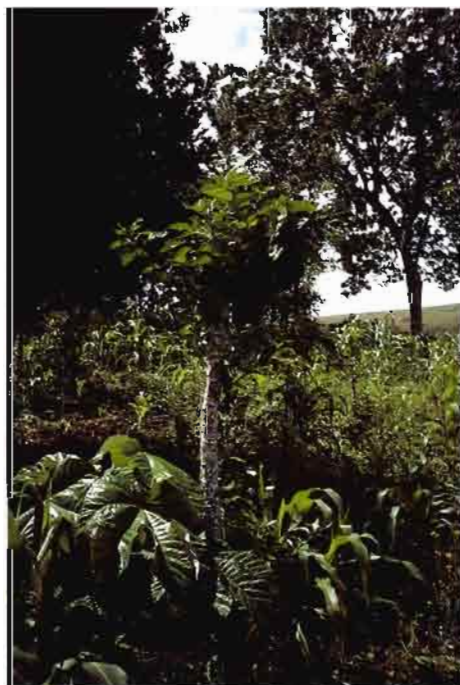
Billonnage drainant : Mont Okou, Cameroun. Sur les fortes pentes (20 à 40 %), le billonnage légèrement oblique, avec un drain tous les 10 m permet de casser l'énergie du ruissellement et d'accumuler un gros volume de terre humifère bien aérée pour cultiver les légumes à racines (manioc, igname, patates douces ou irlandaises, etc...). Cependant, le simple travail du sol attire vers le bas du versant la couverture pédologique qui s'amincit rapidement. De plus, lors des plus fortes averses, le ruissellement risque de déborder et de creuser des ravines dans les champs ou à leurs limites [photo Bedel].



Parc à Karité en savane soudano-sahélienne : Yatenga, Burkina Faso. Lorsqu'il prépare la terre (céréales, coton, arachide, etc...) le paysan préserve une quarantaine d'arbres utiles à l'hectare (fruits, fourrage, médicaments, bois noble, litière améliorante, etc...). Noter aussi les tentatives de gestion de l'eau et de la fertilité (cordon de pierres, d'herbes et de branchages, le gauffrage du sol pour piéger l'eau et le fumier).



Défrichement traditionnel sélectif. Le feu est un outil indispensable en milieu traditionnel pour se débarrasser progressivement et sélectivement de la végétation arborée. Noter à l'avant plan le sol qui reste couvert et garde son réseau racinaire, et à l'arrière plan, la jachère forestière qui régénère le sol pendant 12 ans, sous la palmeraie naturelle exploitée en continu. Fresco, SO Côte d'Ivoire.



Lacou, "jardin A" agroforestier à Salagnac, Haïti. Autour de l'habitation, sur les terres en propriété directe, les paysans plantent souvent des haies protégeant un jardin potager + fruitier intensif profitant de la proximité de l'étable et des résidus ménagers. Les interactions positives entre les arbres, le bétail et les cultures y sont optimales.



Les arbres fourragers, plantés au bord des talus, maintiennent la terre en place et procurent une grande quantité de fourrages fort appréciés en raison de leurs qualités nutritives. Aliments riches en azote, ils sont essentiels pour assurer la digestion des fourrages secs et grossiers de saison sèche. District de Gulmi, Népal [photo Ségala].

Culture en couloir entre des haies de Leucaena, Ibadan, Nigéria. L'utilisation des haies vives permet d'entretenir la fertilité du sol en immobilisant 10 à 20 % de la surface cultivable. Cette solution partielle ne peut donc relever le défi du doublement de la population en 20 ans.



Culture sous le couvert de 200 tiges de Cedrella ou de Grevillea, arboretum de Ruhandé, Butaré, Rwanda. En élevant des tiges d'âges différents et en élagant les branches basses et les racines superficielles, on peut arriver à produire sous leur couvert des céréales et autres cultures vivrières à cycle décalé.



Dans la zone sahélienne du Niger (vallée de Tahoua), seules les vallées sont couvertes d'arbres qui envoient leurs racines dans la nappe (Acacia albida). Leur protection est indispensable pour réduire les effets néfastes des vents desséchants sur les cultures [photo Oumarou].

Jardin fruitier et potager en zone soudanaise, Korhogo, Côte d'Ivoire. Après défrichage sélectif, il reste sur les versants un parc à Karité, Néré, Kapokier et autres espèces utiles. Les Sénoufos aménagent les bas fond en rizières et construisent traditionnellement des jardins fruitiers et potagers à l'abri d'une diguette en terre. Une grande variété d'arbres fruitiers y trouvent leur place à côté de quelques bananiers.

Canaux de contour dans les mornes calcaires de Bouchereau, Jacmel, Haïti. Les collines sont couvertes de rendzines grises peu épaisses. Les petites parcelles, louées aux "riches de la capitale", sont délimitées par des canaux de contour rapidement remplis de sédiments, juste bons à servir de sentier sur ces pentes très raides. Cet aménagement n'ayant jamais augmenté les rendements, n'est pas entretenu par les paysans, sauf moyennant salaire. Le défrichement est généralisé, sauf autour des habitations.



Citerne individuelle à Jacmel, Haïti. Le développement rural a démarré dans cette région par la construction de citernes captant l'eau de pluie sur les toits ou sur une petite aire cimentée : cette eau a permis d'améliorer l'hygiène familiale, de réduire la corvée d'eau, d'abreuver le bétail et d'arroser un petit jardin potager et fruitier.

Jardin de ravine à Jacmel, Haïti. Une fois "la terre finie", les versants sont décapés jusqu'à la roche pourrie et abandonnés à la jachère (RAK), parcourue par le bétail. Seuls les bas-fonds sont encore productifs si on y dresse des murs de pierres sèches qui piègent l'eau et les sédiments.



Les pistes stabilisées et les citernes communales à Salagnac, Haïti. L'une des premières actions en faveur du développement en montagne est de créer des pistes. Mais ces pistes sont souvent à l'origine de graves ravinements. Aussi, les a-t-on bétonnées de façon à collecter le ruissellement du versant dans un bac désableur puis dans une grande citerne communale où l'eau sert au bétail, aux soins ménagers et à irriguer un petit jardin potager plus fruitier de contre saison.



Gestion de l'eau sur la toposéquence de Salagnac, Haïti. Un peu plus bas, la couche de sol est plus épaisse et cultivée en buttes de manioc associé aux haricots et maïs. Plus bas encore, sur le replat où sont installées les habitations, le sol rouge est beaucoup plus épais et intensément cultivé (jardins multiétagés). Ces parcelles risquent d'être ravinées par le ruissellement venant des sommets des collines décapées : il est donc important de capter ce ruissellement sur la piste.



Haies de bordure de parcelle à Salagnac, Haïti. On aperçoit au premier plan les grandes boutures servant de haies protégeant des passants la parcelle cultivée à gauche. Le projet a tenté d'améliorer ces haies en y introduisant des espèces fourragères et fruitières. En arrière plan, on aperçoit des surfaces rocheuses (=terres finies) sur laquelle se concentre le ruissellement.



Petite Rivière de Nippe, Haïti. L'altération des sols basaltiques donne naissance à un paysage ondulé couvert de vertisols fertiles. Traditionnellement la plantation de sorgho se fait en semis direct. Les bordures des champs sont plantées de Vetiver qui résiste bien au surpâturage mais pas au ravinement des fonds de vallée. Les manguiers produisent des fruits en abondance utilisés pour l'élevage des porcs : depuis la peste porcine leur feuillage, une fois séché, sert de fourrage mais beaucoup de manguiers ont été vendu pour produire des planches.



En montagne le ruissellement et l'érosion linéaire ($E=100$ t/ha/an) décapent le sol jusqu'à la "Cangahua", couche indurée impropre à l'agriculture. Bassin de Cayambe, altitude = 2800 m [photo De Noni].



Station de mesure des risques de ruissellement et d'érosion, des états de surface et des rendements en fonction des pluies naturelles sur des parcelles témoins (nues ou sous cultures traditionnelles) et des parcelles aménagées (1000 m²). Mojanda, altitude = 3300 m [photo De Noni].



Des murets isohypses en blocs de "Cangahua" ou en mottes d'herbes, construits selon les pratiques locales ont modifié le terrain en terrasses progressives et réduit l'érosion hydrique à des valeurs acceptables (moins de 5 t/ha/an) [photo De Noni].



Aménagements de versant par la communauté rurale de Pedro Moncayo, altitude = 3300 m. Les bons rendements sur les parcelles expérimentales encouragent les paysans à investir dans la GCES ; s'ils s'engagent par contrat à entretenir les ouvrages, ils peuvent recevoir un prêt permettant d'acheter les intrants suffisants pour doubler les rendements. Au remboursement, au bout d'un an, le prêt va à une autre famille : une petite aide finit par toucher toute une communauté ! [photo G. Noni].





Les marnes et les roches tendres sont très sensibles à l'érosion hydrique. Suite au défrichement de pentes fortes, aux cultures extensives de céréales et au surpâturage depuis des siècles, la colline a perdu 1 m d'épaisseur : l'érosion en nappe et en rigoles sont bien visibles. La forme du tronc indique également des mouvements en masse.

Sur la colline marneuse voisine, on observe l'évolution de l'érosion en nappe au sommet, en rigoles et en ravines sur les fortes pentes tandis que l'oued attaque le pied de la colline (glissement des berges).



L'érosion en nappe n'apporte que quelques tonnes de sédiments au bas de la colline. Par contre, le ravinement et les divagations de l'oued entraînent des centaines ou des milliers de tonnes de sédiments directement jusqu'au barrage. Ceci devrait avoir des conséquences sur les lieux et les stratégies d'intervention de lutte antiérosive sur les bassins versants.

Pour développer l'agriculture de montagne, la coopération a introduit l'arboriculture fruitière qui augmente très nettement les revenus des paysans. Cependant, les abricotiers perdent leurs feuilles en hiver durant la saison des pluies ; ces vergers protègent donc très mal le sol. Dans cette parcelle de 35 % de pente il manque 15 à 30 cm de sol au bout de 30 ans. Ouzera, Algérie.



Pour réduire les risques de ruissellement et d'érosion et améliorer encore les revenus, l'équipe de recherche INRF-ORSTOM a associé sous les arbres des bandes d'arrêt enherbées et des rotations (fèves et céréales) couvrant le sol durant la période pluvieuse et bouclant son cycle avant le début de l'été. Sans réduire la productions de fruits, on a ajouté une production de grains et de paille intéressant l'élevage tout en réduisant les risques d'érosion. Cette approche a été bien accueillie par les paysans voisins. Algérie.

Le paysage en demi-orange typique des régions gneissiques du Vietnam (Bac Thai) est parfaitement aménagé du point de vue de la gestion des eaux, de la biomasse et des éléments fertilisants. Le sommet et les fortes pentes sont protégés par une culture de thé. Le ruissellement irrigue des cannes à sucre et une rizière avant d'aboutir à un étang entouré d'une collection d'arbres utiles. Les tilapias nourrissent les hommes les poulets et les cochons. Ces derniers recyclent les résidus de bananiers et de cannes à sucre : leur fumier fertilise la rizière et l'étang. Les nutriments peuvent ainsi être recyclés plusieurs fois par an.



Sur ces champs de la zone soudano-sahélienne du Burkina, on aperçoit des cordons de pierres pour freiner la vitesse de l'eau, un parc d'acacia et des tas de fumier qui vont être enfouis dans le sol : un complément minéral est indispensable. C'est l'interaction de l'ensemble de ces modes de gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments qui permet d'espérer une agriculture durable relativement productive [photo Dugué].



La GCES dans le district de Gulmi, Népal. Le cas des moyennes collines du Népal illustre la complexité des systèmes traditionnels de production associant une gestion fine de l'eau sur les terrasses irriguées à flanc de versant ou dans les fonds de vallée, et intégrant l'agroforesterie et l'élevage pour la reproduction de la fertilité sur les champs aménagés en terrasses progressives [photo Ségala].



"Jardins multiétagés de ravine" à Petite Rivière de Nippe, Haïti. Le ruissellement sur les versants basaltiques entraîne la formation de ravines facilement maîtrisées par des seuils de terre protégée par des sacs plastiques. Les sédiments recueillis sont aussitôt plantés par une grande diversité de fruitiers, bananiers, canne à sucre et divers arbustes fourragers. Ces jardins de ravine sont finalement valorisés intensément comme des "oasis linéaires".



Pour aménager les versants raides des Sierras équatoriennes, on a construit des murettes en blocs de roche ou en touffes d'herbes réduisant l'érosion hydrique à moins de 5 t/ha. Pour valoriser ces aménagements, il a fallu apporter en outre une série d'intrants tel que les engrais chimiques, les grains améliorés et les pesticides. C'est l'ensemble de ce paquet technologique qui a permis à la fois de stabiliser les versants et d'intensifier l'agriculture [photo De Noni].



Les jessours dans les Matmata, Tunisie. Dans les zones semi-arides où la végétation ne peut se développer sur les versants, il est possible de construire des diguettes en terre et en cailloux pour capturer derrière ces petits barrages les eaux de ruissellements et leur sédiments. On y plante des céréales sous différents arbres fruitiers (palmiers, oliviers et figuiers) [photo Chassany].



Plateau central au Rwanda. L'administration a forcé les groupes de paysans à creuser des fossés aveugles (0,5 x 0,5 x 10 m) pour stocker les eaux de ruissellement. Ces fossés exigent beaucoup de travail (250 j/ha à l'implantation + 50 j/ha d'entretien) sans augmenter la production. Si les fossés ne sont pas entretenus, ils se remplissent de sédiments et provoquent des ravinements ou des glissements de terrain. Actuellement, la majorité des fossés a disparu, laissant des talus et des terrasses progressives.



Les terrasses de diversion du ruissellement, Le Cap, Afrique du Sud. Cette méthode ne réduit pas la dégradation des sols, n'augmente pas les rendements et exige l'entretien des fossés. En cas d'averse de fréquence rare, les eaux débordent des terrasses et provoquent des ravinements (gauche de la photo). Par contre à droite, une parcelle protégée par du trèfle ne montre aucune trace d'érosion : les méthodes biologiques s'avèrent beaucoup plus efficaces que les terrassements mécaniques.



Les talus enherbés pour dissiper l'énergie du ruissellement (CVHA, Burundi). On sait en effet que si le ruissellement a une vitesse inférieure à 25 cm/sec, il ne peut creuser de ravine (Hjülstrom). Au lieu de concentrer les eaux qui ruissellent, il convient de développer des techniques culturales laissant une forte rugosité à la surface des champs (labour grossier, paillage) et des structures antiérosives perméables (talus enherbés, haies vives, cordons de pierres) capables de ralentir les eaux et de les étaler en nappe.



Diguettes en terre isolant une citerne au Yatenga, Burkina Faso. Dans les zones soudano-sahéliennes, les villages manquent terriblement d'eau à la fin de la saison sèche. Des petits barrages en terre permettent de capter les eaux de ruissellement venant des collines pour abreuver les animaux et créer un petit jardin irrigué.



Le paillage des terres dégradées permet de restaurer à la fois leur capacité d'infiltration et leur fertilité grâce à l'action de certaines termites qui redistribuent les matières organiques dans leurs galeries. Yatenga, Burkina Faso.



Jardins multiétagés irrigués par un "bouli", petit barrage en terre. Sabouna, Burkina Faso. Les eaux de ruissellement collectées par une modeste digue en terre permettent d'abreuver le bétail dès le début de la saison des pluies et d'irriguer un petit jardin potager précoce.



Le développement des rizières en terrasse à flanc de versant est lié à la possibilité d'une irrigation gravitaire. La disponibilité saisonnière en eau et l'altitude déterminent ensuite la possibilité d'entreprendre une à trois cultures par an. District de Gulmi, Népal [photo Ségala].



La méthode du Zai nécessite l'enfouissement de 3 tonnes de poudrette (=fécès séchées au soleil) ou de terre de parc dans la cuvette. C'est la concentration des eaux et du fumier disponible qui permet de restaurer la productivité de ces terres dégradées dès la 1ère année. En réalité, ces matières organiques apportent non seulement un minimum d'éléments minéraux mais aussi la microflore nécessaire pour rendre assimilables les nutriments du sol.



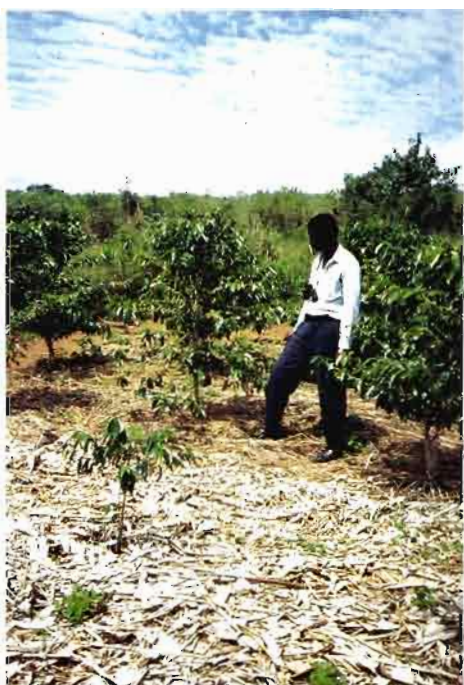
Compostière irriguée par les eaux de ruissellement au champ, Ziga, Burkina Faso. Il s'agit de créer une compostière au champs pour éviter le transport des résidus de culture, puis du compost. Malheureusement, le temps de compostage (18 mois) et la qualité du produit organique laisse à désirer : on s'oriente dorénavant vers l'aménagement de "compostière-fumière-poubelles" proches des habitations qui permettent de produire 5 m³ par famille d'un produit bien décomposé recyclé dès la saison suivante.



La jachère de légumineuses cultivées en dérobée sous la céréale est une autre solution, permettant d'augmenter la biomasse, de ramener en surface des nutriments et de protéger le sol durant les premiers orages. Cependant elle n'est possible qu'en région soudanienne où les pluies sont supérieures à 1000 mm et durent plus de 5 mois.

Sous les caféiers, un paillis épais (25 t/ha/an) permet à la fois de retenir l'humidité du sol en saison sèche, de protéger la surface contre l'érosion, de réduire la concurrence des adventices et de concentrer les éléments nutritifs récoltés sur l'ensemble de l'exploitation. La difficulté consiste à produire suffisamment de biomasse sans déséquilibrer toute l'exploitation.

L'entretien de la fertilité des champs par apport de fumier est lié à un système d'affouragement complexe. On observe un véritable transfert de fertilité des zones incultes vers la sole cultivée. District de Gulmi, Népal [photo Ségala].



Après une courte jachère, le paysan amène au bétail au piquet un complément de fourrage dont les résidus seront recyclés directement lors du labour. Jacmel, Haïti.

Le transport du fumier est une des raisons qui limite son emploi aux abords immédiats des habitations, dans les jardins de case [photo Ségala].



Contrat de fumure : Boukere, Burkina Faso. Traditionnellement, les paysans des savanes africaines proposent aux éleveurs de faire pâturer les résidus de culture par leur bétail en échange de leur stabulation aux champs durant la nuit. Il en résulte une fumure localisée qui peut être très importante en volume, mais pauvre en azote car les fécès sont exposées au soleil et piétinées.

Le parcage de nuit au Mali sud. Lorsque les animaux sont rassemblés dans un parc pour passer la nuit, ils accumulent une masse de déjections telle que plus rien ne pousse. On en extrait les poudrettes, fécès écrasées par les sabots des animaux et mélangées à une quantité variable de terre de parc. La qualité de ce produit non fermenté (donc bourré de graines prêtes à germer) peut être amélioré par l'apport d'une litière de paille grossière. La production de ce fumier amélioré peut atteindre 1,5 t/ha/bovin/an.

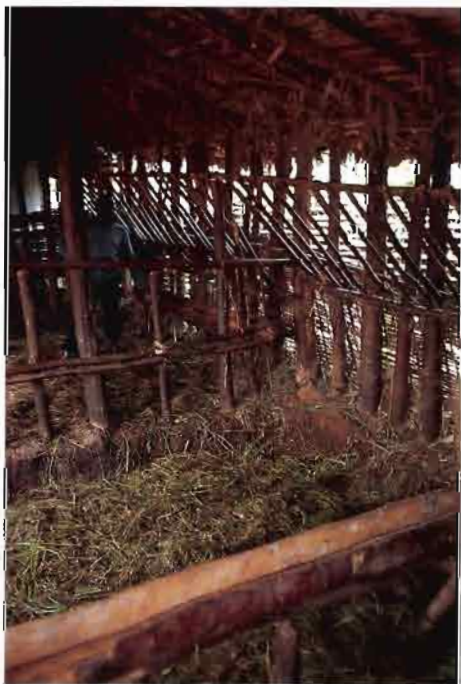


Pour améliorer la répartition des déjections animales sur les champs cultivés, on peut aussi construire un coral mobile à l'aide de barbelés. Mali.

Etable fumière : Kaniko, Mali sud. En culture attelée, on abrite souvent une paire de boeufs sous une étable élémentaire dont le toit permet de stocker les résidus de culture. La litière jointe aux urines et fécès est transportée dans la fosse fumière où elle fermente et réduit le stock de graines vivantes d'adventices. En y joignant les déchets du ménage, les cendres et autres résidus organiques, un exploitant peut produire jusqu'à 5 t/an d'un fumier composté de bonne qualité, surtout s'il y enfouit un complément minéral (N, P, Ca) pour compenser les carences du sol.



Fosse fumière-compostière dans un village du Yatenga, Burkina Faso. Son efficacité pourrait être améliorée si la fosse était entourée d'arbres dont les racines récupèrent les solutés de nutriments qui s'échappent avec les eaux de drainage, dont la litière ramène de la biomasse riche en nutriments et dont l'ombrage maintient une ambiance favorable au compostage.



Le stade ultime consiste en une étable où le bétail vit en permanence en stabulation sur sa litière. Projet CVHA, Bugaramé, Burundi. Arrosée quotidiennement et tassée par les animaux, la litière évolue rapidement en un fumier de bonne qualité.



Paddock entouré de haies vives (Leucaena, Eucalyptus, etc...) en courbes de niveau. Bugaramé, projet CVHA, Burundi. L'étable est intégrée à la maison.

Lignes d'herbes et micro-terrasses en escalier sur les fortes pentes de la région de Ruhengeri, Rwanda. On observe à l'avant plan des lignes de *Pennisetum* qui ralentissent un peu l'érosion sur ces pentes de 60 %. Au second plan à droite, on peut observer des micro-terrasses de 50 cm de large creusées dans l'horizon humifère et protégées par un talus enherbé. Cette trame d'herbes permet de maintenir le sol en place tout en produisant des cultures vivrières sur des pentes atteignant 80 %. Notez également les plantations d'eucalyptus dans les zones où le sol risque de glisser.



Les terrasses radicales au Rwanda. Pour absorber l'ensemble des pluies et maintenir la fertilisation permettant d'intensifier la culture, on a lancé au Rwanda la construction de terrasses radicales. Il s'agit de construire les talus avec les mottes d'herbes du terrain, de déplacer l'horizon humifère, de construire la terrasse avec une contre pente de 4 % et de rejeter l'horizon humifère sur cette surface presque horizontale. Malheureusement, le sous-sol étant stérile, il est nécessaire non seulement d'investir 1000 jours de travail par hectare pour le terrassement, mais encore d'apporter 10 tonnes de fumier, 3 tonnes de chaux, et 300 kg de NPK pour valoriser ce genre d'aménagement. Cette méthode n'est donc pas à la portée de tous les paysans du Rwanda. De même, il existe quantité de collines où il serait dangereux de construire ces aménagements sur des pentes susceptibles de glisser.



Talus enherbé avec bananeraie à la base, Burundi. Certains techniciens souhaitent réduire la densité des bananiers entre les structures antiérosives pour intensifier la culture vivrière. Cependant, la bananeraie permet de maintenir une culture rentable en apportant dans le trou de plantation une masse de résidus organiques qui en s'humifiant va entretenir la souche de bananier.

Le talus enherbé retient la terre repoussée par le ruissellement et surtout par les travaux cultureux. Plateau central, Burundi.

TROISIEME PARTIE

Etudes de cas

LA GCES FAVORISE LA DIVERSITE REGIONALE DANS LA LUTTE ANTIEROSIVE EN FONCTION DE CONDITIONS ECOLOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

Dans la **première partie** de cet ouvrage, nous avons souligné la diversité des manifestations de l'érosion dans l'espace (effet d'échelle) et dans le temps.

Nous avons montré que l'importance économique de l'érosion peut être grave pour une communauté régionale, surtout au niveau des nuisances à l'aval, causées par les débits de pointe du ruissellement et la dégradation de la qualité des eaux, les transports solides qui encombrant les réservoirs et les lits des rivières. Quant à la dégradation des terres cultivées et à la perte de productivité des sols soumis à l'érosion, elle est très variable selon les types de sol, les conditions d'aridité et la position topographique. L'analyse historique des stratégies de lutte antiérosive montre que l'homme a manifesté depuis des millénaires sa capacité d'adaptation aux changements de situations écologiques et humaines, c'est-à-dire aux crises d'érosion. Mais récemment, devant l'accélération des changements démographiques et socio-économiques des dernières décennies, une nouvelle crise d'érosion se dessine dont les causes varient selon qu'on analyse une région de grande culture (motorisation trop poussée et mal adaptée), une région semi-aride agro-pastorale extensive (dégradation du couvert végétal, des matières organiques du sol) ou une zone de montagne densément peuplée (intensification de l'exploitation sans apport équilibré de nutriments).

La lutte antiérosive n'est donc pas seulement un problème technique (encore qu'on est loin aujourd'hui de disposer partout des techniques efficaces), mais aussi (et plus encore), un problème humain. D'où la proposition d'une approche nouvelle basée sur la nécessité de prendre en compte les problèmes urgents (intensification de la productivité des terres et du travail) tout en préservant l'avenir par une optimisation de la gestion des eaux disponibles, de la biomasse et des nutriments.

Dans la **seconde partie**, nous avons rapidement traité des cinq modes principaux d'érosion en rappelant les causes et les facteurs déterminant l'importance de chacun d'eux et en décrivant quelques principes de lutte antiérosive : le détail des techniques antiérosives a été décrit dans de nombreux manuels (Hudson, 1973 ; Heusch, 1989 ; CTFT, 1970 ;

Hurni, 1989). Nous nous sommes attachés à détailler les problèmes posés par la maîtrise de l'érosion en nappe et rigole, l'érosion débutante, celle que les paysans peuvent maîtriser sur leurs parcelles.

C'est généralement sur leurs champs que tout se joue et c'est là que se manifeste le génie paysan qui peut tirer parti de la diversité de son environnement écologique et socio-économique pour développer des techniques très variées de gestion de l'eau et de la fertilité des terres.

Pour des raisons pédagogiques, nous avons analysé la cause et les facteurs de l'érosion en nappe (et rigole) à travers le modèle empirique de Wischmeier et Smith. Nous en avons montré l'intérêt et les limites. L'approche systématique, à travers ce modèle empirique, permet de définir les risques d'érosion en nappe, sur des champs situés sur des pentes moyennes (1 à 20 %) et de proposer d'une façon moins empirique, une palette de solutions pour réduire à un niveau théoriquement tolérable les pertes moyennes en terre sur une vingtaine d'années. Ce modèle ne tient compte ni des pluies exceptionnelles (typhons avec fort vent, tornades tropicales de 500 mm en un à trois jours), ni des interactions entre les différents segments fonctionnels d'une toposéquence (accumulation d'eau en bas de versant), ni des pentes fortes (> 20 %) où l'énergie du ruissellement l'emporte sur celle des gouttes de pluie, ni surtout des conditions culturelles, sociales et économiques régionales qui interfèrent sur le choix des méthodes de conservation des sols.

C'est pourquoi, dans cette **troisième partie**, nous souhaitons élargir le champ de vision sur la diversité des problèmes et des approches conservatoires, à des milieux très différents, tant au niveau écologique (climat tempéré, semi-aride méditerranéen ou soudano-sahélien, zones forestières subéquatoriales, montagnes surpeuplées, etc...) qu'au niveau humain (pays développé ou en développement, pression démographique de 10 à 700 hab/km²). Une série de cas concrets, décrits par des auteurs francophones travaillant dans des régions bien différentes, essaient d'ébaucher les voies de la GCES pour répondre aux besoins actuels d'intensification de la productivité des terres et du travail tout en améliorant l'environnement rural. Comme la GCES est relativement récente, le choix des exemples est encore limité et le recul n'est pas encore suffisant pour tirer des conclusions définitives de ces expérimentations.

Au chapitre 9, nous comparons les conditions écologiques et les problèmes de dégradation des sols tout au long d'une séquence bioclimatique partant de la zone subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire, traversant les zones soudano-sahéliennes du Mali et du Burkina, pour finalement évoquer la zone sahéenne d'Afrique occidentale.

Au chapitre 10, J.M. Fotsing évoque l'évolution du bocage Bamiléké au sud-ouest du Cameroun où l'érosion est inversement proportionnelle à l'intensification de l'agriculture.

Au chapitre 11, nous rapportons les résultats actuels des recherches sur l'intégration de l'agroforesterie dans l'agriculture de subsistance des populations très denses (150 à 800 hab/km²) cultivant les pentes raides du pays des Mille Collines, le Rwanda.

Le chapitre 12 évoque le cas d'Haïti et la mise en oeuvre d'une approche GCES s'appuyant sur la participation des populations dans une logique de développement rural.

Au chapitre 13, une équipe franco-équatorienne analyse la situation des petits paysans (minifundios) sur la Cordillère volcanique des Andes équatoriennes et présente les solutions récemment développées chez les paysans.

Au chapitre 14, nous rapporterons les premiers résultats de recherche d'une équipe franco-algérienne (INRF-ORSTOM), cherchant à définir les risques d'érosion et à développer une agriculture intensive sur les fortes pentes des régions montagneuses semi-arides méditerranéennes du nord de l'Algérie.

Enfin, au chapitre 15, J.F. Ouvry, agronome au service d'AREAS, fait le point des problèmes qui se posent dans la gestion des eaux de surface dans le cadre des grandes cultures intensives dans les plaines à climat tempéré du nord de la France.

Nous aurons atteint notre objectif, si en refermant cette troisième partie, le lecteur prenait conscience qu'il ne suffit pas d'appliquer des recettes qui ont eu quelques effets positifs (non vérifiés), quelque part dans le monde.

La lutte antiérosive ne peut plus se concevoir sans une analyse fine :

- des risques des différents types d'érosion à différentes échelles ;
- des stratégies traditionnelles existantes pour gérer l'eau et les nutriments et restaurer la fertilité des terres ;
- des problèmes démographiques et/ou socio-économiques, des problèmes fonciers et politiques liés à la crise d'érosion ;
- des moyens d'intensifier la production de biomasse ;
- des coûts et de la capacité d'investissement des exploitants et/ou des communautés dans une stratégie GCES.



Chapitre 9

Diversité des stratégies de lutte antiérosive en Afrique occidentale ; de la forêt subéquatoriale aux savanes soudano-sahéliennes

EXEMPLE DE SEQUENCE AGROCLIMATIQUE

Si on effectue un transect entre Abidjan et le Sahel, 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 Senoufos ont l'habitude de remuer énormément le sol en construisant de très grosses buttes (environ 80 cm de hauteur) pour cultiver des tubercules (igname, manioc). Les années suivantes le champ est billonné, les résidus posés dans les sillons sont recouverts avec la terre des buttes.

Trois cents kilomètres plus au nord, les Miniankas 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 encore plus au nord, les Mossis de la région des savanes arborées soudano-sahéliennes 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 non travaillé et sarclent en construisant des buttes entre les plants pour concentrer l'eau à proximité des poquets de mil (débuttage).

Cette grande diversité des techniques culturales n'est pas le fruit du hasard, mais la résultante d'une longue adaptation de chaque ethnie à la zone écologique où elle vit. Plus les gens sont installés depuis longtemps en un site, et plus les conditions de vie sont difficiles, plus ils auront développé des stratégies de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols adaptées à leur environnement écologique et socio-économique. On peut noter apparemment que si les paysans n'ont guère mis au point de techniques adaptées, c'est qu'ils ont souvent migré récemment d'un milieu où les contraintes sont fort différentes. Par exemple

au Cameroun, les Capsikis, paysans des monts Mandara près de Mokolo, construisent des terrasses en gradins et des murettes en pierres 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.

Les techniques culturelles traditionnelles observées sont généralement fort bien adaptées aux conditions écologiques du milieu. On peut s'en rendre compte en comparant les bilans hydriques.

Actuellement, **ces stratégies traditionnelles sont presque abandonnées, en fait elles ne sont plus suffisantes** pour faire face aux problèmes de dégradation des sols qui apparaissent avec la pression démographique. Les populations des zones de savane sahéenne et de montagne doublent tous les vingt ans ! Heureusement, une partie de cette population émigre en zone soudanienne et allège ainsi la pression foncière de ces zones sahéennes très fragiles. L'analyse de ces stratégies traditionnelles forme cependant **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. 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 dans les années 1930 pour l'agriculture motorisée américaine, on avait étudié plus en détail les méthodes traditionnelles et proposé une stratégie 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, des situations écologiques générales (surtout le bilan hydrique par type de culture), et des conditions socio-économiques (surtout la pression démographique) [planche photographique 10].

LUTTE ANTIEROSIVE EN ZONE FORESTIÈRE SUBEQUATORIALE : ZONE D'ABIDJAN EN BASSE COTE D'IVOIRE

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 et 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.

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 enfin de bas-fonds plats ensablés hydromorphes. Les sols des collines sont ferrallitiques, sablo-argileux, très résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,10$). Ces sols sont perméables mais très acides et pauvres chimiquement.

Les pluies annuelles moyennes sont de l'ordre de 2 100 mm et 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.

LES RISQUES

Au sommet des collines, sur pentes faibles, les risques sont de deux ordres :

- d'une part, la dégradation des sols due à la minéralisation rapide des matières organiques, à la battance et à la squelettisation de l'horizon de surface ;
- d'autre part, le risque d'acidification due à l'abondance du drainage et à la lixiviation des éléments fertilisants.

Sur les fortes pentes convexes, il y a, en plus des précédents, des risques de ravinement. Enfin dans les bas-fonds, les sols hydromorphes présentent essentiellement des risques d'engorgement en saison des pluies, et de dessèchement en saison sèche. Ces zones étant souvent tourbeuses et sableuses, les sols sont très acides ; il faudra donc corriger l'acidité de ces sols.

LES PROPOSITIONS D'AMÉLIORATIONS (figure 60)

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 (céréales, manioc ou diverses cultures vivrières), 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 organiques et minéraux. 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, sauf si les plantes cultivées sont capables de les capter et de les stocker dans leurs tissus.

FIGURE 60

Lutte antiérosive en milieu guinéen forestier subéquatorial : ex. région d'Abidjan

Diagnostic	Pluie	2100 mm/an	Pluie mens. max. =	700 mm/mois
	Pluie 1/10	250 mm/jour	ETP mensuelle	1200 mm/an
	R _{USA}	1200	Fort drainage env.	1000 mm/jour

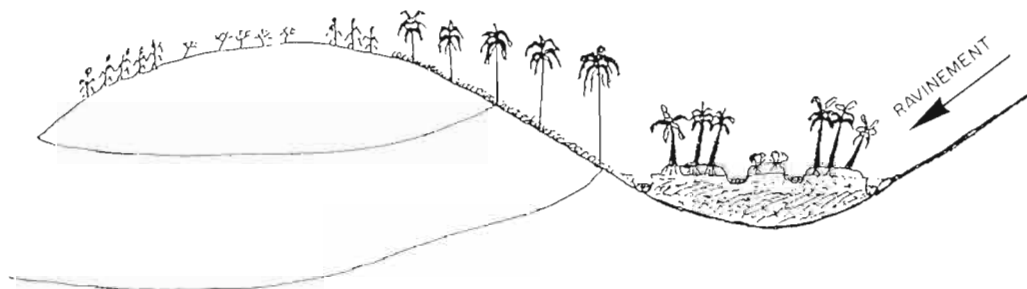
Sols ferrallitiques sablo-argileux acides perméables

forte érosion

forte lixiviation

Risques

E. nappe		
battance	Idem	
squelettisation	+	Ensablement
lixiviation	Ravinement	Engorgement
acidification	décapage	Acidification

**Améliorations****Plateaux convexes**

- Couvrir le sol : planter tôt + dense + cultures associées
- Fertilisation équilibrée avec les besoins des cultures
- Gestion des matières 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 matières organiques + fertilisation minérale d'appoint fractionnée
- Bananeraies + horticulture

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 du 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 des pâturages ou si possible, des cultures arborées avec un sous-étage de légumineuses (*Pueraria* et *Centrosema* en mélange). 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.

Enfin dans les vallées, le problème est d'organiser le drainage des 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 matières organiques, de chaux et de nutriments minéraux en tenant compte des risques d'entraînement de ces éléments minéraux par le drainage.

LUTTE ANTIEROSIVE EN MILIEU TROPICAL HUMIDE DANS LES SAVANES SOUDANAISES DE KORHOGO (NORD COTE D'IVOIRE)

TECHNIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Après un défrichement sélectif et progressif par brûlis s'étalant sur plusieurs années, les Sénoufos 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 déposent entre les buttes les mauvaises herbes, 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 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. Lors des pluies excédentaires, les eaux s'écoulent vers un fossé de drainage qui évolue souvent, malheureusement, en ravine. L'orientation des billons est quelconque et change d'un champ à l'autre.

Les Sénoufos ont une longue tradition d'agroforesterie. Lors du 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 sont préservées. D'année en année, ils protègent les souches de ces arbres tout en les rabattant pour permettre les cultures vivrières.

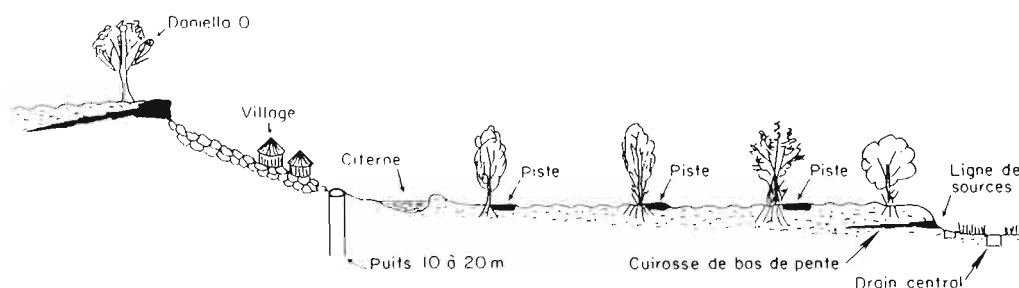
FIGURE 61

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 sable-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 %

Billonnage en pente douce vers des exutoires

lignes d'arbres ± haies vives



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 + septembre
- Ensablement à partir des ravines

Améliorations

- Fertilisation organique et minérale des terres de plateau profondes
- le reste, parcours à reboiser (anacardier, teck, eucalyptus)
- En aval : les villages + puits
- Citerne 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 pluvial 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

Dans les bas-fonds hydromorphes, les Sénoufos aménagent des rizières irriguées en creusant un canal d'amenée latéral à la vallée avec prise d'eau excédentaire latérale et drainage central pour évacuer les grandes masses d'eau lors des mois les plus pluvieux.

DIAGNOSTIC DU MILIEU

Les pluies annuelles moyennes varient de 1000 à 1400 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. Les risques de lixiviation et d'érosion sont donc très importants, mais réduits par une végétation abondante.

Le paysage est formé de collines latéritiques tabulaires ou bien de dômes granitiques ceinturés d'éboulis de gros blocs et de longs glacis de sols ferrallitiques rouges ou ocre 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 vert pour le bétail en saison sèche ; mais, depuis une cinquantaine d'années, une forte proportion de bas-fonds est transformée en rizières irriguées, ce qui accentue les risques de surpâturage des versants. 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.

LES RISQUES

Sur la colline, les sols sont bien structurés et drainants. Ils subissent des risques d'acidification par les engrais, de dégradation des matières organiques comme tous les sols tropicaux, et enfin, de lixiviation, vu l'importance du drainage interne affectant ces sols. Si ces sols sont soumis à la mécanisation, ils perdent progressivement la majorité de leur matière organique et de leur résistance à la battance. Ils deviennent donc sensibles à l'érosion et au ruissellement. Sur les fortes pentes, on constate dans les zones à forte population et 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, l'érosion en nappe peut se transformer en ravinement, d'autant plus qu'avec les apports de ruissellement provenant des collines, on peut craindre aussi un engorgement à la surface du sol et une pourriture des tubercules.

PROPOSITIONS D'AMÉLIORATIONS (figure 61)

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 d'anacardiens, de tecks, mais aussi d'arbres fourragers.

Autour de l'habitat, dense dans cette zone, peuvent être prévus de petits jardins fruitiers, irrigués à partir des 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 et alléger la corvée de puisage pour le bétail et pour le village (nappes pérennes situées entre 10 et 30 mètres de profondeur).

Au niveau du bloc de culture, il est souhaitable de garder des champs billonnés de petite taille, en pente douce, plus ou moins cloisonnés avec éventuellement un semis de riz pluvial 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, on peut 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, le drain central par où passe la rivière permet d'évacuer 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 serait sage de prévoir la culture de fourrage en saison sèche à l'emplacement des rizières et vers les points les plus humides de la vallée, des haies vives permettraient de mieux canaliser le bétail.

LUTTE ANTIEROSIVE EN MILIEU TROPICAL DE SAVANE DANS LA REGION DE KOUTIALA AU MALI : Agriculture pluviale sensu stricto

TECHNIQUES CULTURALES 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, avec la mécanisation et la traction animale, les terrains cultivés sont choisis sur le glacis limono-sableux et les techniques culturelles se limitent à un labour et deux sarclages-buttages.

L'élevage est toujours extensif. Pendant la saison des pluies, un berger (souvent étranger) entraîne les animaux du village sur les parcours. En saison sèche, le bétail profite des résidus de culture et des derniers herbages verts dans les bas-fonds.

Le soir, les boeufs sont réunis dans des parcs protégés par une haie morte. Dans ces parcs s'accumule 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 subsiste, dans le bloc cultivé un parc de karité, néré, rarement de *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 du ruissellement provenant des parcours et des collines latéritiques assez dégradées.

LE DIAGNOSTIC DU MILIEU

Les pluies diminuent progressivement de 1000 à 700 mm. La pluie mensuelle maximum est égale à 250 mm et le drainage diminue de 200 mm pratiquement à 0. L'indice d'érosivité de Wischmeier R_{USA} varie de 350 à 500 et la pluviométrie journalière décennale est de 120 mm. Les sols ferrugineux tropicaux peu acides, peu désaturés, limoneux, sont fragiles, sensibles à la battance. 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.

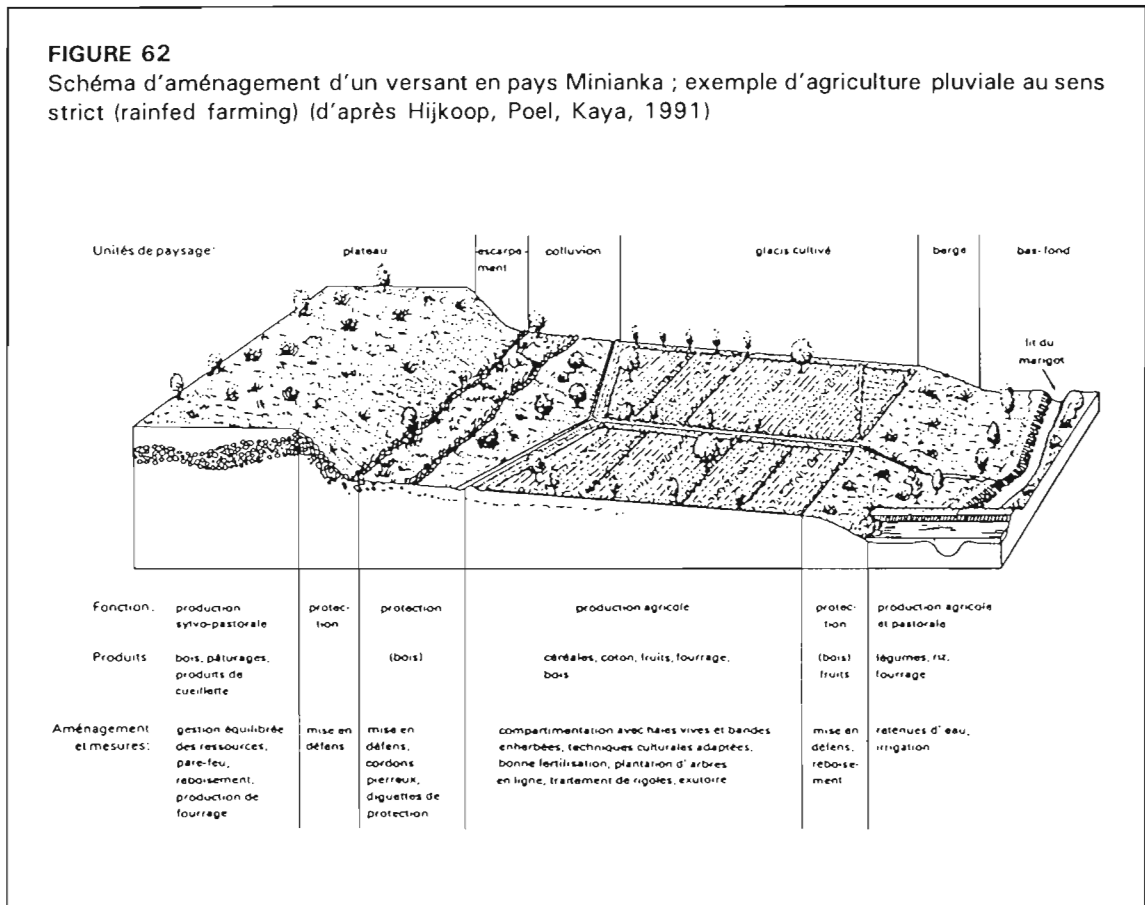
LES RISQUES

Sur les sols gravillonnaires des collines, les dangers proviennent d'une dégradation de la végétation par surpâturage, qui entraîne la réduction de l'infiltration. La concentration du ruissellement favorise 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, il faut signaler le ravinement provenant des collines ainsi que le dépôt de plages de sable et de gravillons et 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 traversant tout le bloc de culture.

PROPOSITIONS D'AMÉLIORATIONS (figure 62)

Sur le plateau cuirassé, il faut tendre à freiner le ruissellement par des cordons de pierres, régénérer les herbes et les arbustes fourragers et reconstituer le capital fourrager. En bas de cette zone, on peut imaginer le creusement de citernes avant les digues de protection. Celles-ci collectent 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 de chemin 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 profond 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 en saison sèche, 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. 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.



LA LUTTE ANTIEROSIVE DANS LES SAVANES SOUDANO-SAHELIENNES DE LA REGION DE OUAHIGOUYA (NORD-OUEST BURKINA FASO) : Agriculture sous impluvium

LES TECHNIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Les paysans Mossi ont un comportement de pionniers. Ils défrichent en brûlant pratiquement tous les arbres à part quelques Acacias, *Sclerocarya birrea* et Baobabs, etc...

Ils sèment le sorgho sur les meilleures terres et le mil (et quelques arachides et niebe) sur les terres sableuses ou gravillonnaires, 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 un ou deux sarclages à la houe. Sur les terres sableuses du nord, le sarclage s'accompagne d'un débattage qui améliore l'infiltration de l'eau au niveau des touffes de mil.

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*; ensuite ils abandonnent la terre à la jachère pâturée.

Pour récupérer les terres épuisées, ils pratiquent la méthode du zaï qui consiste à piéger le ruissellement dans une petite cuvette 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 et Rodriguez, 1991 ; Roose, Dugue et Rodriguez, 1992).

La tradition **des boulis ou trous d'eau** de quelques dizaines de mètres cubes avec rejet des terres vers l'aval en demi-lune, permet également de récupérer une fraction du ruissellement provenant des collines pour alimenter en eau le bétail près des parcours et irriguer un petit jardin (Dugué, 1988). Enfin, s'ils manquent de terre, les paysans Mossi récupèrent grâce à des alignements de pierres (structurés en nid d'abeille), les "**zipelle**", surfaces érodées, dénudées et encroûtées où la végétation naturelle ne peut même plus se développer par défaut d'infiltration. Ces alignements de pierres, d'herbes ou de piquets ralentissent le ruissellement et provoquent le dépôt de matières organiques et de sédiments grossiers et perméables. Dès la seconde année, l'horizon sableux déposé 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 sur les parcours pendant la saison des pluies. Après les récoltes, les animaux profitent des résidus de culture, mais ensuite, se débrouillent comme ils peuvent en errant à travers tout le territoire.

LE DIAGNOSTIC DU MILIEU

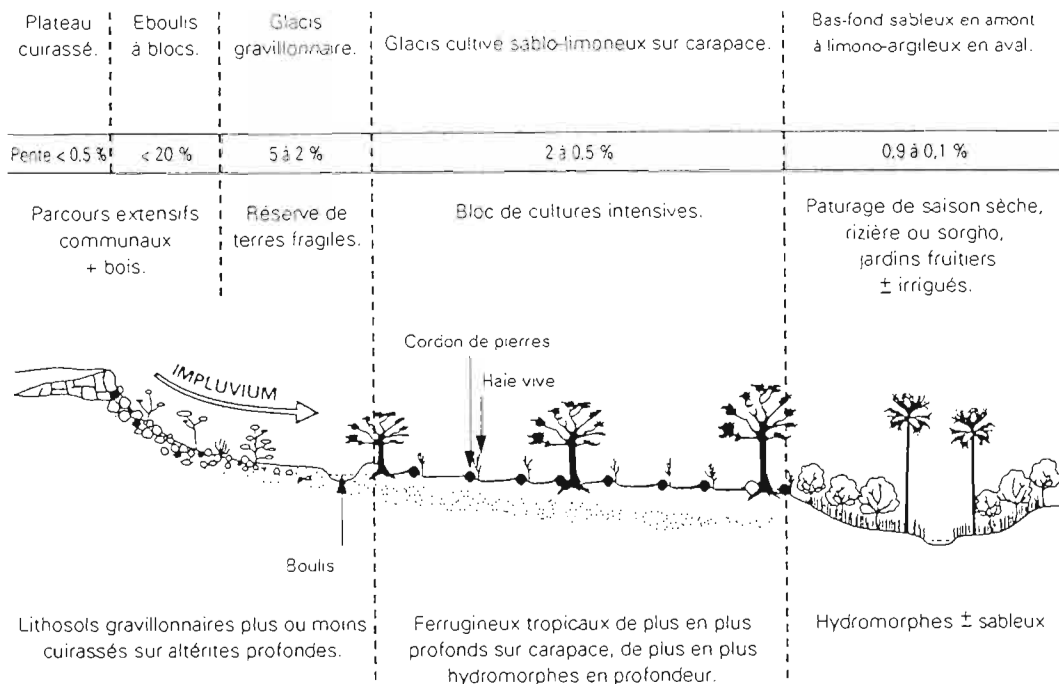
Les pluies annuelles diminuent du sud au nord de 700 à 400 mm. Les pluies mensuelles maximum, dépassent rarement 100 mm et le drainage n'est qu'occasionnel, de 50 à 0 mm. L'agressivité des pluies R_{USA} diminue de 400 à 200 ; la pluie journalière de fréquence décennale dépasse rarement 100 mm. Le paysage 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, sous les nappes gravillonnaires, 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.

LES RISQUES

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 favorise 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. Ces sols ont une très faible réserve en éléments nutritifs. Il faut donc parvenir à nourrir les plantes au fur et à mesure de leurs besoins alimentaires. Enfin au niveau des bas-fonds, il faut déplorer la dégradation générale des sols par surpâturage et

FIGURE 63

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 oligo-éléments : 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

Améliorations

Impluvium non cultivé

- Stockage du ruissellement.
 - 1/2 lunes, microcatchment.
 - boullis pour le bétail. pour irriguer un jardin.
 - lac collinaire sur site favorable
- Mise en défens (contrat de 5 ans).
 - enrichissement en arbres 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* 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 derrière les boullis.
- Organiser des couloirs pour le bétail.
- Rotation des parcs à bétail.
- Fosse fumière/compostière près de l'habitat.
- Fertilisation complémentaire à la demande des cultures.

Cultures irriguées + jardins fruitiers de contre-saison

- Etaler 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.
- Eviter les grands arbres qui pompent trop dans la nappe.
- Maintenir une zone fourragère filtrante

par culture sans restauration de matière organique ou d'aliments nutritifs. De plus, les ravines en amont entraînent à leur tour le ravinement du fond du lit de la rivière et/ou l'ensablement général du bas-fond. Les grands bas-fonds sont difficiles à gérer car ils sont inondés pendant plusieurs jours à l'occasion des plus fortes averses, deux ans sur trois.

LES PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS (figure 63)

Sur les collines cuirassées et le glacis gravillonnaire, il faut prévoir l'amélioration des parcours, leur reforestation avec l'aide d'essences arbustives fourragères si on peut organiser une mise en défens partielle pendant cinq ans. Pour ce faire, on peut tenter de freiner le ruissellement par des cordons de pierres et réimplanter des herbes, suite à un grattage du sol en sec (à la dent soussoleuse) et procéder à l'épandage de débris organiques (branchettes, écorces, pailles) ou de pierres qui vont piéger l'eau, le sable et des graines. 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 parc à karité, *Acacias albida* et 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 sols sont préparés et que les cultures sont en pleine croissance.

Enfin, dans les vallées irriguées, on peut envisager la formation de diguettes filtrantes en tête des vallées pour étaler les crues, piéger un 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. Cette méthode de micro-barrages perméables améliore les rendements et contribue à la sécurité alimentaire de ces régions très pauvres pratiquement sans cultures de rente. De plus, les aménagements envisagés sont extrêmement bon marché et à portée de n'importe quel paysan.

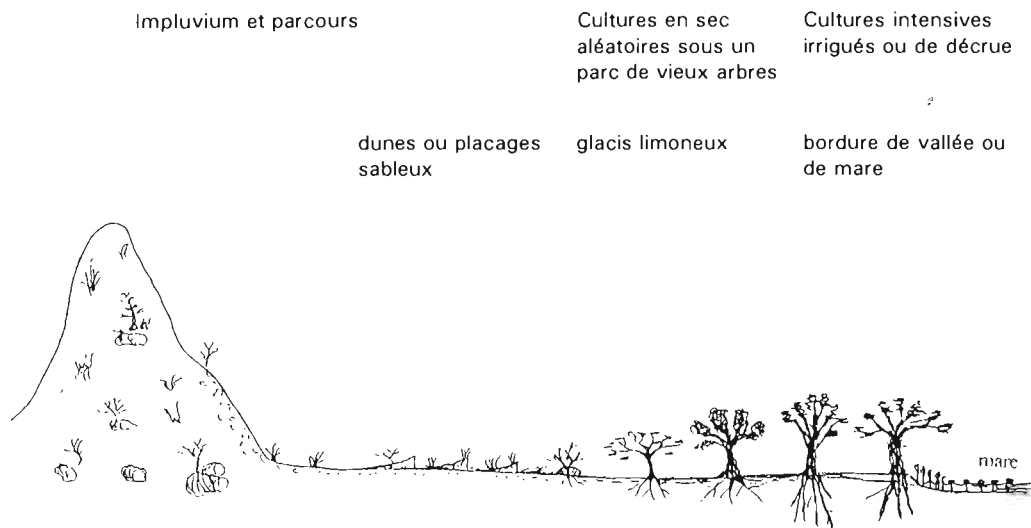
LUTTE ANTIEROSIVE DANS LA ZONE NORD-SAHELIENNE AUX ALENTOURS DE LA MARE DE DORI (BURKINA FASO) : Cultures localisées dans les bas-fonds (valley farming)

LES TECHNIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Dans la zone à moins de 400 mm de pluie, on constate une nette rupture avec les conditions des régions soudanaises. Les pluies sont plus erratiques et limitées dans l'espace. Alors

FIGURE 64

Schéma d'aménagement d'un terroir sahélien ($P < 400$ mm) : exemple d'un système agropastoral où l'agriculture intensive est limitée à la vallée (valley farming)



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

soils bruns rouges semi-arides

soils hydromorphes assez fertiles

Soils pauvres : carences en N et P, pauvres en matières organiques, risque de salinisation

Soils 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

Améliorations

- 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 niébé
- 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

qu'au nord du Sahara, en milieu méditerranéen où les pluies tombent en saison froide, 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, 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 sur sols limoneux et 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 abandonner 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 qui migrent en fonction des opportunités. L'usage comme combustible des résidus de culture et même des déjections animales montre à quel point cette zone manque de bois.

LE DIAGNOSTIC DU MILIEU

Les pluies varient de 400 à moins de 150 mm ; 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.

LES 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.

LES PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS (figure 64)

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

TABLEAU 39

Variabilité des conditions écologiques sur un transect bioclimatique d'Afrique occidentale – Diversité des propositions d'améliorations (d'après Roose, 1992)

Zone écologique Précipitations Cas étudié	Guinéenne forestière 2500 à 1200 mm en 2 saisons (Abidjan)	Sud soudanienne 1400 à 1000 mm en 1 saison (Korhogo)	Nord soudanienne 1000 à 700 mm Koutiala	Sud sahélienne 700 à 400 mm Ouahigouya	Nord sahélienne 400 à 150 mm Mare d'Oursi
Pluies ann. moyennes Pluies mensuelles max. Pl. journ. 1/1 1/10 1/100 Intensité max 1/1 1/10 Erosivité des pluies R _{USA} ETP (mm) Drainage calculé	2100 mm 700 mm 135-230-280 (mm) 90-120 (mm/h) 1260 1250 mm 1200 à 800 mm	1350 mm 318 mm 76-119-169 (mm) 75-106 (mm/h) 675 1660 mm 470 à 160 mm	900 mm 250 mm 62-107-166 (mm) 60-80 (mm/h) 420 1750 mm 180 à 10 mm	725 mm 207 mm 55-101-146 (mm) 59-78 (mm/h) 360 1905 mm 50 à 0 mm	535 mm 177 mm 49-79-109 (mm) 32-45 (mm/h) 260 2000 mm 0 mm
Diagnostic des risques - lixiviation, acidification - érosion en nappe - érosion en ravine - engorgement	++++ ++++ + bas-fonds	+++ +++ +++ versants et bas-fonds	++ +++ +++ bas-fonds	++ +++ +++ bas-fonds	- ++ (sur glacis) ++ (sur glacis) bas-fonds
Sols du versant	ferrallitiques très désaturés SA ± gravillonnaires très acides	- ferrallitiques désaturés ± gravillonnaires - ou vertisols/sols bruns sur roches basiques	- ferrugineux lessivés SA ± gravillonnaires - ou vertisols/sols bruns sur roches basiques	- ferrugineux lessivés SA ± gravillonnaires - ou vertisols/sols bruns sur roches basiques	- ferrugineux peu lessivés sableux sur dunes - ou sols bruns rouges subarides
Végétation	Forêt ombrophile dense humide + Panicum, etc.	Savane arborée Daniella, Parkia, Butyrospermum + Andropogon + divers	Savane arborée Parkia, Butyrospermum + épineux + Andropogon + divers	Savane arbustive à Combretum, Baobab, acacias + épineux Andropogon + divers Pennisetum	Steppe ou bush Boabab, Acacia, Balanites, Ziziphus graminées annuelles
Agrosystèmes	Cover farming = couverture du sol infiltration totale	Drainage farming = drainage des excès durant les 2 mois les + humides	Rainfed farming = infiltration totale des pluies	Runoff farming capture pluie + ruissellement	Valley farming. Concentration de l'eau et des cultures dans les vallées
Densité des populations (hab/km ²)	20 à 40	30 à 100	30 à 50	70 à > 100	10 habitants/km ²
Techniques traditionnelles	- manioc + maïs + condiments associés sur petites buttes - café, cacao, palmier et colatiers sous ombrage - jachère forestière	- ignames sur grosses buttes - maïs + divers condiments sur billons moyens - mil → arachide sur sol dégradé + billons - cultures associées aux arbres utiles - drainage entre parcelles	- culture à plat + 1 sarclage + 1 buttage sorgho/coton ou mil/arachide/niebe - passage des eaux collinaires - infiltration pluies sur champs - murettes ou cordons de pierres	- semis direct à plat après brûlis puis 1 sarclage et 1 buttage : sorgho ou mil/arachide/niebe - paillage, zaï, boli - alignements pierres ou herbes - sur dunes sableuses débuttage	- semis direct à plat + 1 sarclage débuttage - mil sur sable - sorgho sur glacis et bas-fond argilo-limoneux - pâturage ext. sur versant - jardin potager sur bas-fond - culture de décrue sur mares
Aménagements proposés	GCES - gestion des mat. organiques + NPK = f. des cultures + chaux si pH < 4,5 - couvrir le sol + plantation dense, précoce + cultures associées + arboriculture + pl. couvertures - talus enherbés ou haies vives sur versants - drainage des bas-fonds	CES (1964-68) Reboisement des cuirasses Bandes d'arrêt/versant Fixation des ravines Protection des rizières	GCES 1985-91 - amélioration parcours - bandes de régénération - cordons : de pierres ; de tiges de coton - diguettes de protection à amont du bloc culture - autour des champs : haies vives + arbres - exutoires enherbés - aménagements bas-fond	DRS du GERES 1960-65 - puis CES ORD + FEER - GCES CIRAD + CRPA 1986 = amélioration parcours + mares bétail + jardins + cordons pierres + andropogon + haies vives autour des champs = aménag. ravines et routes + am. bas-fonds	GCES - arbustes fourragers dans demi- lunes - améliorations parcours - mares pour bétail - captage du ruiss. sur le glacis/colline - diguettes filtrantes sur glacis ou ravineau - cultures fourragères de bas- fond

cultivées. Les jachères disparaissant, les sols s'épuisent et le coût des intrants (fertilisation minérale et variétés 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 Ségué (nord du Yatenga) :

- 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 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 que la culture.

CONCLUSIONS

Du survol de cette séquence bioclimatique, on peut conclure que parallèlement à l'évolution des techniques culturales en fonction du bilan hydrique, il faut adapter le mode de gestion des eaux au niveau des structures antiérosives (voir tableau 39). On comprend mieux de ce fait, l'une des raisons des échecs des multiples projets de CES-DRS qui s'acharnent à appliquer l'unique modèle développé par Bennet à une autre époque, dans des conditions de climat tempéré et de culture motorisée intensive.

On comprend aussi les paysans traditionnels qui, non seulement n'entretiennent pas les aménagements imposés, mais les détruisent lorsqu'ils constatent qu'ils sont peu adaptés à la situation de leurs cultures.

L'analyse des stratégies traditionnelles, parallèlement au bilan hydrique mensuel, pourrait orienter les projets futurs de gestion de terroir qui devraient s'attacher à les améliorer avec la connivence des fermiers et des éleveurs.

C'est une aventure de recherches et de développement de longue haleine où les aspects humains sont aussi importants que les aspects techniques. Il est donc nécessaire de prévoir des équipes multidisciplinaires de suivi et d'évaluation de ces projets.



Chapitre 10

Evolution du bocage Bamiléké

EXEMPLE D'ADAPTATION TRADITIONNELLE A UNE FORTE DEMOGRAPHIE

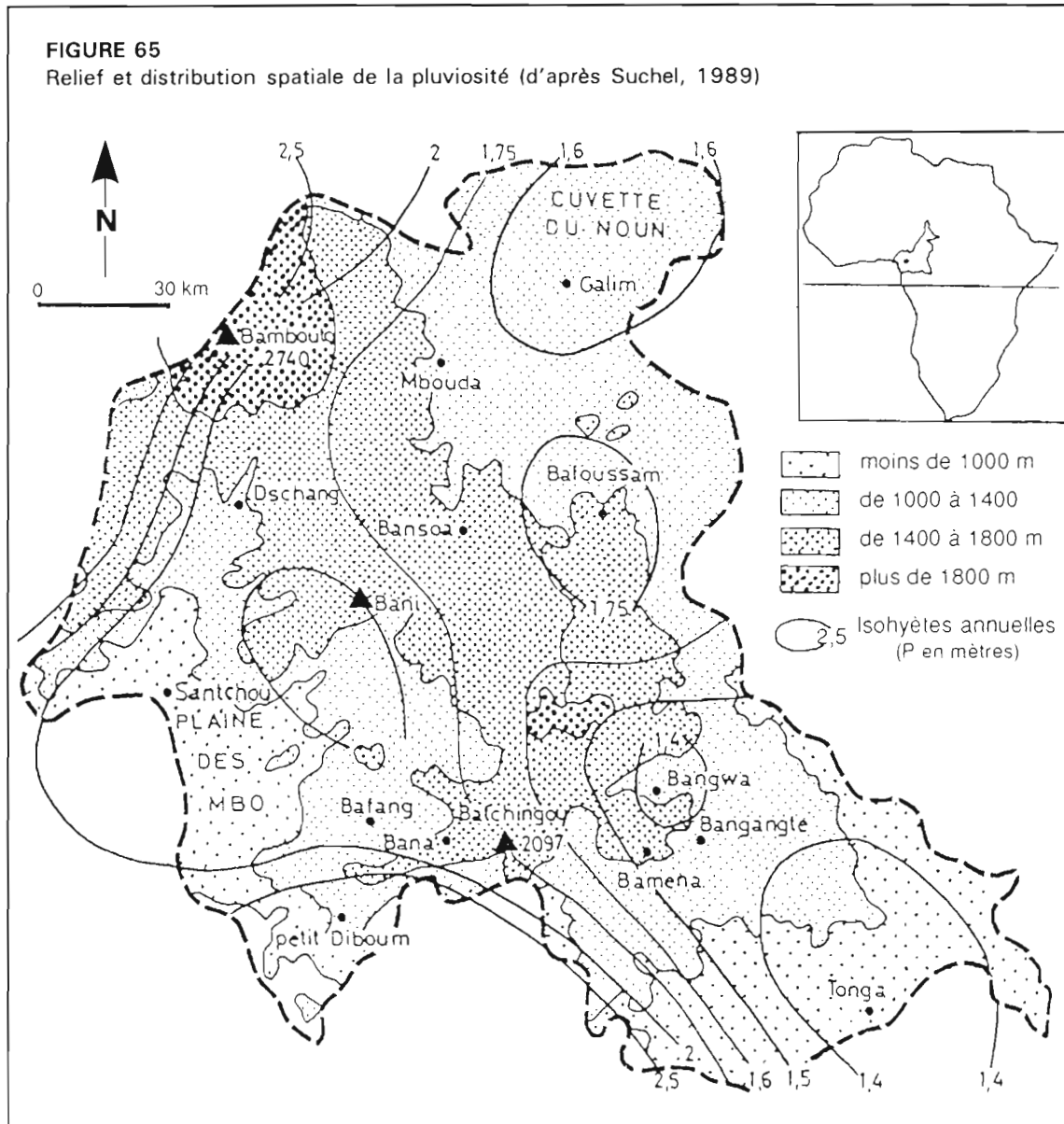
PROBLEMATIQUE

Situés en Afrique centrale, entre le 5^e et le 6^e degré de latitude nord, les plateaux bamiléqués occupent 6196 km² au sud des hautes terres de l'Ouest-Cameroun (figure 65). Avec une densité moyenne de 168 hab/km² atteignant localement 600 hab/km², c'est une des rares régions tropicales d'agriculture pluviale traditionnelle supportant de telles charges démographiques. Un diagnostic des techniques d'exploitation des terres montre que celles-ci sont relativement efficaces du point de vue du maintien de la fertilité et de la lutte antiérosive. Cependant, les transformations en cours dans la région aboutissent d'une part, à la simplification des aménagements dans les zones anciennement occupées et d'autre part, à l'extensification des méthodes d'exploitation du sol dans les zones récemment mises en valeur. Ainsi, la forte pression démographique, l'augmentation du nombre de cases et les exigences socio-économiques actuelles peuvent avoir des conséquences néfastes sur un environnement pour le moins fragile. Dès lors, les précipitations relativement peu agressives, ont de plus en plus tendance à se concentrer en surface et, les ruissellements qui s'en suivent menacent les terres agricoles situées sur des terrains pentus. Que faire? Peut-on imaginer une montagne dense, productive et stable? La réussite mitigée du Projet de Développement Rural de la Province de l'Ouest, qui proposait entre autres, le creusement de fossés antiérosifs, l'aménagement des versants en gradins et la fertilisation minérale, nous conduit à envisager des solutions essentiellement fondées sur les savoir-faire locaux dans ce milieu aux potentialités agricoles élevées.

DIAGNOSTIC : DES MILIEUX RELATIVEMENT FRAGILES

UN RELIEF VALLONNE MARQUE PAR DES PENTES FORTES

Le pays Bamiléké est un haut plateau d'environ 1450 m d'altitude moyenne. Il se décompose en trois unités orographiques majeures qui se succèdent de 700 à 2740 m d'altitude (figure 65).



Jusqu'à 1100 m d'altitude, les plaines en situation périphérique (Noun à l'est et Mbo au sud-ouest), occupent près de 20 % des superficies. Leur platitude est interrompue par de petites collines aux versants à pentes faibles (moins de 12 %).

Entre 1100 et 1600 m, les plateaux forment l'ossature principale du relief sur plus de 70 % du territoire. On y distingue deux sous ensembles :

- le plateau granito-gneissique au sud, avec des reliefs polyconvexes ou en demi-oranges sur lesquels affleurent par endroits des boules de granites,
- le plateau basaltique vers le nord, avec une topographie plus calme où les interfluves en croupes surbaissées, arrondies ou allongées sont séparés par des vallées étroites. Les pentes supérieures à 25 % et celles comprises entre 12 et 25 % y dominent.

Au-dessus de 1600 m, les montagnes (moins de 15 % du territoire), présentent une topographie plus heurtée avec 75 % des surfaces situées sur plus de 25 % de pente. Il s'agit d'une part, de petits massifs granitiques culminant à moins de 2100 m vers le sud, et d'autre part, de la chaîne volcanique des Bamboutos au nord-ouest qui, par gradins successifs, porte les altitudes jusqu'à 2740 m (point culminant de la région).

DES PLUIES PEU AGRESSIVES SUR DES SOLS VULNERABLES

Le climat est du type subéquatorial de mousson à dominante humide et fraîche, à une saison des pluies (mi-mars à mi-novembre). Les précipitations annuelles sont partout supérieures à 1400 mm (Bangangté : 1457 ; Bafang : 1731 ; Bafoussam : 1796 ; Santchou : 1727 ; Dschang : 1919 ; Baranka : 2500). Les pluies diminuent grossièrement d'ouest en est mais aussi du sud au nord en fonction de l'altitude. Les hauteurs d'eau maximales sont enregistrées en août-septembre. A Bafoussam par exemple, ils atteignent 90 à 116 mm en mars-avril-mai et 118 mm en août. Cependant, les intensités horaires sont faibles (entre 15 à 40 mm/h). Les températures sont rafraichies par l'altitude (à Bafoussam les maxima se situent entre 23 et 27° C).

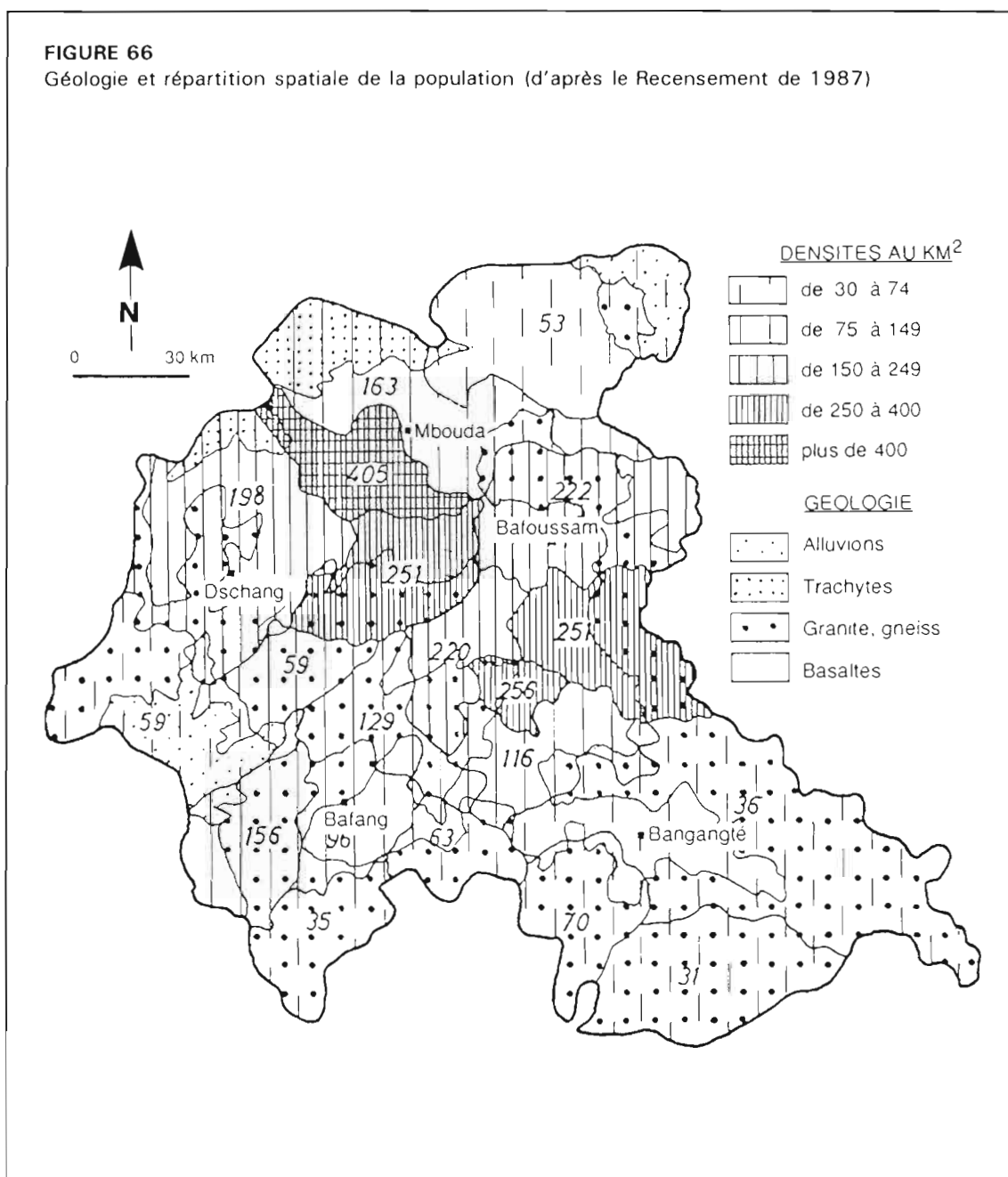
Les sols se classent en trois groupes (Segalen, 1967 ; Champaud, 1973) :

- les sols ferrallitiques dérivés de basaltes sont les plus répandus. Leurs propriétés physiques et hydriques sont très favorables : grande épaisseur, porosité élevée, friabilité et absence de cailloux, forte teneur en argile et perméabilité de surface. Les sols ferrallitiques indurés portent par endroit des affleurements de cuirasses.
- les sols peu évolués proviennent des roches volcaniques meubles basiques (cendres, lapillis). Ils sont très riches en matières organiques, azote et bases échangeables et très perméables.
- les sols hydromorphes – sableux et carencés sur granite, tourbeux sur basalte et alluvions – occupent les fonds marécageux. Ils sont relativement peu fertiles mais la présence d'eau, la platitude et les teneurs élevées en matières organiques, en font de bonnes terres agricoles.

La texture des sols est très diverse avec des taux de limon de 10 à 30 % et d'argile de 10 à 70 %. Cependant, quelle que soit leur nature, les sols présentent des nuances locales suivant la position sur la toposéquence. D'une manière générale, ils sont plus épais, moins grossiers et plus fertiles sur les bas de versants que sur les parties hautes. Ces particularités locales sont mises en évidence dans l'exploitation et l'aménagement traditionnels de l'espace agricole.

UNE PRESSION DEMOGRAPHIQUE FORTE MAIS VARIABLE SUIVANT LE SUBSTRAT GEOLOGIQUE (figure 66)

Le pays Bamiléké est une région d'occupation humaine ancienne et de forte pression démographique. Sa densité moyenne de 168 hab/km² (1987), n'a guère de signification particulière. Les densités sur basalte sont partout supérieures à 200 hab/km², et dans certains



secteurs, elles avoisinent et dépassent 1000 hab/km² (Ducret & Fotsing, 1987). En dehors de la zone basaltique, elles ne dépassent qu'exceptionnellement 150 hab/km² (les plus faibles densités se trouvent dans les zones alluviales et sur les massifs montagneux).

La forte pression démographique est accentuée par la dispersion de l'habitat et le système d'héritage qui lègue la totalité du patrimoine foncier familial à l'unique héritier mâle. Les fils non-héritiers devenant de facto de nouveaux fondateurs de lignage, doivent trouver ailleurs des terres pour s'installer. Avec des taux de croissance annuelle de 3,2 %, la pression foncière ne cesse de s'accroître malgré un exode massif vers les villes.

DES TECHNIQUES TRADITIONNELLES EFFICACES

La mise en valeur des terres en pays Bamiléké est caractérisée par l'association et/ou la juxtaposition de l'agriculture et de l'élevage. Les systèmes agraires sont relativement complexes et les aménagements qui les accompagnent varient suivant la prépondérance de l'agriculture sur l'élevage (ou vice-versa) et la permanence des établissements humains. On y distingue d'une part les systèmes intensifs, et d'autre part les systèmes extensifs.

LES SYSTEMES INTENSIFS TRADITIONNELS (figure 67)

Ils sont pratiqués sur les zones habitées du plateau où les exploitations familiales disposent des trois terroirs indispensables à l'autonomie de chaque famille (bas-fond, versant et sommet de colline). On y pratique une polyculture intensive associée au petit élevage (moutons, chèvres, porcs, volailles) dans un paysage de bocage. Les exploitations familiales (généralement inférieures à 3 ha), s'allongent sur les versants et associent une gamme variée de plantes, depuis le sommet jusqu'à la vallée.

Les parties supérieures des versants portent soit des pâturages pour les moutons et chèvres (*Pennisetum purpureum*, *Panicum maximum*) soit des champs vivriers (temporaires ou permanents) où l'arachide est associée au maïs, à la patate douce, aux haricots, aux ignames, aux pois de terre. Là où les densités sont peu élevées, l'usage du feu pour les défrichements et pour le renouvellement du fourrage est pratiqué.

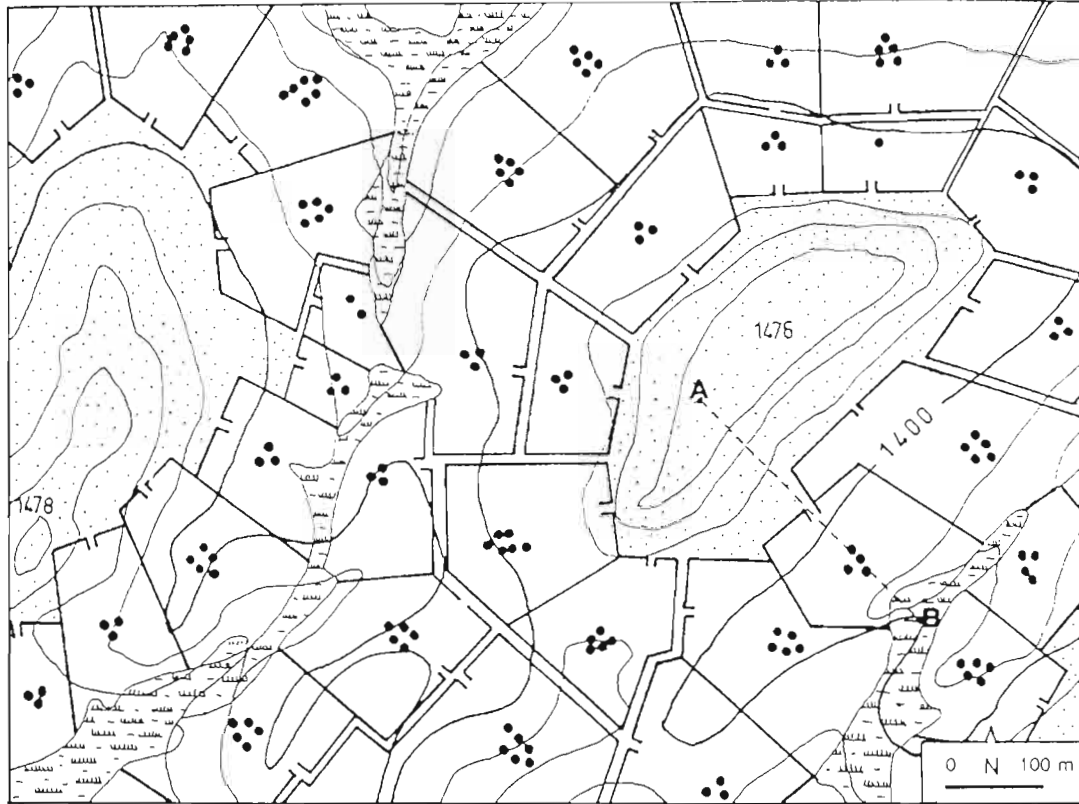
Les parties intermédiaires sont le domaine de l'habitat et des jardins multi-étagés aux associations culturales complexes. Dans les caféières ombragées, maïs, arachides, macabos, maniocs, taros, ignames, légumes, condiments divers, bananiers... en proportions variables, prospèrent à proximité des caféiers et des arbres fruitiers ou forestiers autour des habitations et de l'enclos à porc. Sur les parcelles exclusivement réservées aux cultures vivrières, une deuxième campagne de cultures (haricot, patate douce, pomme de terre) succède à la récolte du maïs. L'omniprésence des arbres donne au paysage un aspect touffu. On y dénombre entre 120 et 130 arbres à l'hectare.

Les bas fonds sont réservés aux palmiers raphias, *Raphia farinifera*, à la lisière desquels s'étendent de petits champs de tubercules (macabo, taro, ignames, manioc...), associées à quelques bananiers et légumes divers.

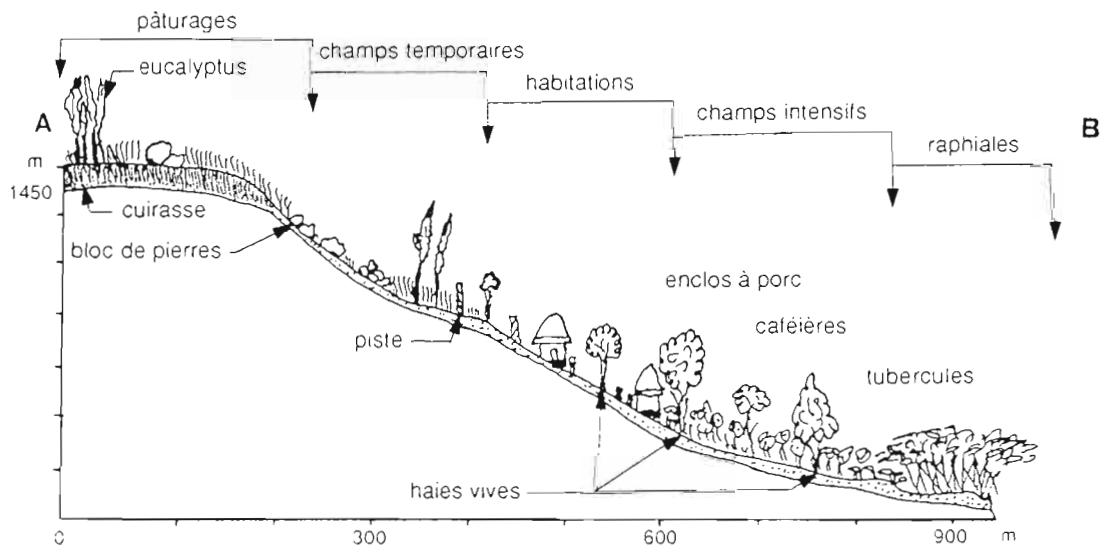
Les techniques de maintien de la fertilité des sols sont multiples :

- **le recours à la jachère** permet la reconstitution naturelle des éléments nutritifs du sol. Sur les champs vivriers intensifs, c'est une courte jachère d'inter-saison culturale, alors que sur les champs d'arachide des sommets de collines, la jachère est annuelle ou pluri-annuelle.
- **l'intégration de l'élevage à la culture** : les parcelles laissées en jachère, sont pâturées par les moutons et chèvres qui exploitent les résidus des récoltes et déposent leur fumier. L'enclos à porc est régulièrement déplacé tout autour des habitations et l'emplacement libéré mis en culture. Le fumier ramassé sur les lieux de séjour fréquent du bétail (porcherie, aires de stationnement des poules et des chèvres et petits enclos à volaille de début des semailles), est disposé dans les sillons.

FIGURE 67
 Organisation traditionnelle de l'espace (fragment agrandi d'un quartier du plateau granitique)



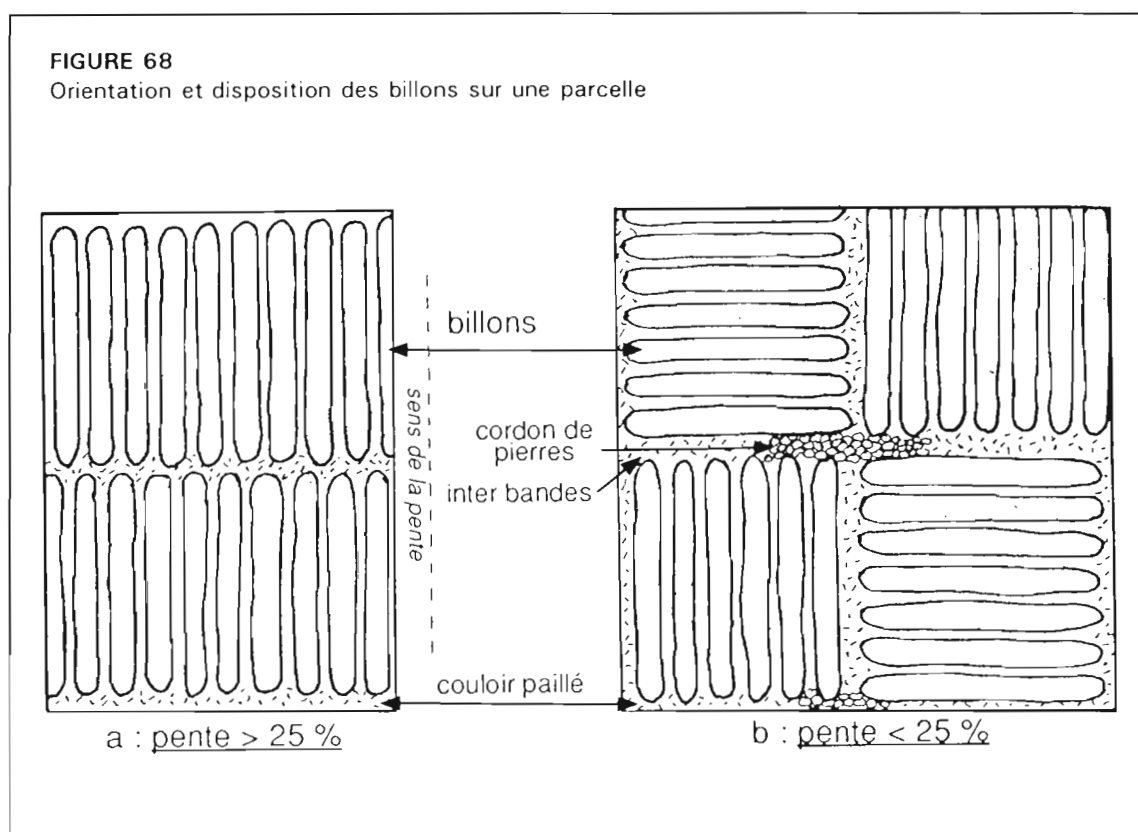
- | | | | | | |
|--|---------------------|--|------------------|--|----------------------------|
| | raphiale (vallée) | | bloc de cultures | | clôtures et chemins |
| | pâturages (sommets) | | cases | | passage entre les clôtures |



- **L'enfouissement des matières organiques sous les billons** : les résidus de récoltes, le fumier du bétail, les déchets et cendres domestiques et toute matière organique pouvant enrichir le sol sont entreposés dans les sillons et recouverts de terre lors de la préparation des champs. Cependant, toute la fumure organique n'étant pas transformée pendant la saison culturale, les labours réexposent en surface les déchets non humifiés qui protègent partiellement les sols.
- **le recyclage de la biomasse** : il est particulièrement efficace au regard de l'alternance régulière entre billons et sillons. Pendant que les premiers portent les cultures, les seconds reçoivent les déchets domestiques et de sarclage qui vont fertiliser le futur billon. Ainsi, à chaque saison culturale, une partie du sol est moins sollicitée que l'autre et se reconstitue pour accueillir les cultures à la saison suivante.
- **la pratique de l'écobuage** : elle consiste à entasser les herbes arrachées sur les parcelles, les recouvrir de terre puis, à partir d'un trou aménagé sur le côté, on y met le feu. La combustion lente conserve toutes les cendres issues de l'incinération, les protège des eaux de pluies et facilite la fertilisation des sols.

Les méthodes de lutte antiérosive sont variées :

- **L'association de plusieurs cultures sur le même billon** : elle assure la stabilité du billon, une bonne couverture du sol et réduit l'érosion. On comprend dès lors, pourquoi les gros billons disposés dans le sens de la pente résistent efficacement au ruissellement.
- **la pratique de deux campagnes culturales** : limitée aux parcelles vivrières, elle assure une couverture permanente du sol surtout lorsque les cultures de la première campagne sont en partie présentes sur les champs.
- **L'association des arbres aux cultures** : ces arbres fruitiers ou forestiers fournissent l'ombrage nécessaire à certaines cultures, freinent la vitesse des vents, préservent l'humidité du sol. Leur litière protège le sol du choc des gouttes de pluies et freine l'érosion.
- **le maintien des résidus de récoltes sur les champs** : il s'agit des tiges de maïs laissées sur pieds, des fanes d'arachides abandonnées dans les sillons...qui assurent un paillage du sol et le protègent de la forte insolation de saison sèche et des effets néfastes du ruissellement. Certaines tiges servent de tuteur aux ignames plantées plus tard.
- **le quadrillage de l'espace cultivé par des haies vives** : il s'agit des "haies-juridiques" et des "haies-enclos" dont l'agencement délimite des chemins de circulation du bétail des abords des cases aux pâturages communs des sommets. Elles freinent efficacement la course des eaux et piègent les transports solides lorsqu'elles sont horizontalement renforcées de nervures de raphias. Par ailleurs, ces haies vives forestières brisent la vitesse des vents. Constituées d'essences à croissance rapide et reproductibles par bouturage (*Ficus spp*, *Markhamia lutea*, *Polyscias fulva*, *Harungana madagascarensis*, *Podocarpus milanjanus*, *Dracaena arborea*, *Hymenodycton floribundum*, *Datura stramonium*., *Vernonia sp.*), elles représentent une source importante de bois de chauffe, fournissent des tuteurs pour les cultures grimpantes et secondairement du fourrage pour le petit bétail.



- **la taille et la disposition des billons sur les parcelles cultivées** (figure 68) : elles varient suivant la position topographique, les types de cultures et l'épaisseur des sols (seule la longueur du billon est quelquefois imposée par la taille de la parcelle cultivée) :
- sur les pentes fortes aux sols peu épais, les billons de petite taille (50 à 70 cm d'embase et 20 à 30 cm de haut), sont orientés dans le sens de la plus grande pente, et disposés en quinconce du haut vers le bas du versant. Cette disposition – très efficace contre le ruissellement du fait de la couverture totale du billon par les cultures – canalise la circulation des eaux de pluies, et réduit leur vitesse et l'érosion.
 - sur les pentes faibles et moyennes, les gros billons (E=70 à 90 cm, H=30 à 40 cm), sont disposés en damier, avec toutefois une légère préférence aux billons parallèles aux courbes de niveau. Il est alors fréquent de rencontrer sur la même parcelle des billons dans le sens de la pente et des billons perpendiculaires à celle-ci.

En somme, la disposition des billons dans le sens de la pente est bien adaptée aux régions centrales où la faible longueur des versants, la capacité d'infiltration élevée des sols et la culture continue ne permettent ni une concentration des eaux de pluie en surface, ni une grande vitesse d'écoulement superficiel. En revanche, elle ne convient pas aux régions montagneuses et granitiques où l'infiltration est plus faible et la déclivité plus accentuée.

EXPLOITATION DES RESERVES ET DES TERRES MARGINALES

Les fortes pentes, les plaines marécageuses ou hydromorphes et les massifs montagneux sont longtemps restés en marge des aménagements traditionnels. Ces réserves foncières sont cependant exploitées à titre précaire par des pasteurs Mbororos et des cultivateurs autochtones.

- **Sur les pâturages des massifs montagneux**, des pasteurs Mbororos pratiquent un élevage bovin-ovin semi-sédentarisé. L'abondance des herbages n'autorise qu'une courte transhumance de saison sèche. Autour des campements plus ou moins fixes, certains éleveurs pratiquent une agriculture intensive en collaboration avec les autochtones bamiléks pour valoriser le fumier des aires de stationnement nocturne du bétail (Fotsing, 1990).
- **Sur les terres récemment cultivées**, les techniques d'exploitation sont expéditives, les aménagements sommaires et les associations culturales simplifiées à l'extrême. On y pratique de préférence les cultures maraîchères (pomme de terre, oignon, ail, carotte...) ou les cultures vivrières de rapport immédiat (maïs, haricot...), qui ne couvrent que très faiblement le sol.

Ces espaces ouverts brûlés en saison sèche, offrent un paysage d'openfield, parsemé de loin en loin par quelques rares arbres fruitiers. Les seuls boisements présents sont les haies pionnières d'*Eucalyptus* dont l'intérêt antiérosif est négligeable car elles sont situées sur les têtes de vallons et sur les replats, là où les risques d'érosion sont peu évidents.

LES RISQUES

TRANSFORMATIONS RECENTES DES SYSTEMES AGRAIRES

- **Dans les zones d'agriculture intensive**, la "faim de terres" liée à la forte pression démographique, entraîne le fractionnement des exploitations familiales et une densification de l'espace. De plus en plus, on installe les fils ou les frères sur les parties supérieures des concessions et on octroie aux émigrés des parcelles pour la construction de résidences secondaires. Dans les quartiers du plateau basaltique de Bafou, la densité du bâti est de 3,3 cases à l'hectare et le taux d'accroissement annuel des constructions d'environ 3 %, avec des densités de population à la limite du tolérable (plus de 1200 hab/km²). L'espace est moins saturé dans la zone granitique longtemps soumise à une émigration plus intense. Le rythme annuel des constructions y est plus faible (1,5 %), la densité du bâti aussi (0,82 case à l'hectare) (Ducret & Fotsing, 1987).

Sur les exploitations de plus en plus réduites – 1,3 ha en moyenne – le maraîchage entraîne une simplification des haies et une réduction des boisements. La jachère tend à disparaître et l'utilisation des engrais minéraux se généralise à l'ensemble des cultures. Cette fertilisation minérale est complétée par les déchets des élevages hors-sols notamment les fientes des poules. La disparition des pâturages des sommets réduit l'élevage des moutons et des chèvres aux piquets. L'adoption du soja, du maïs "Z 230" et de la pomme de terre "cardinal", variétés culturales vulgarisés par l'UCCAO (Union

Centrale des Coopératives Agricoles de l'Ouest), confirme la tendance à la diversification et parachève la saturation de l'espace agraire.

- **Dans les zones périphériques**, les exigences en terres agricoles favorisent la colonisation anarchique des terres et la mise en culture des pentes fortes. La chasse aux éleveurs porte un coup fatal à l'élevage du gros bétail. Sur les Bamboutos en moins de 5 ans, la colonisation agricole n'a laissé à l'élevage que des terrains pentus impropres à l'agriculture (Fotsing, 1989). Les parcours encore disponibles sont surchargés et gérés suivant des stratégies cycliques articulées sur des déplacements saisonniers (Fotsing, 1990).

DES ZONES DIVERSEMENT EXPOSEES A L'EROSION

La pluie est le principal agent d'érosion qui menace les terres agricoles du pays Bamiléké. Cependant, les précipitations érosives sont celles qui s'abattent sur des sols peu couverts, avec des intensités de 75 à 120 mm/h. Or les averses de 150 mm/h pendant 15 minutes sont relativement fréquentes (Morin, 1989). Elles sont liées aux lignes de grains et tombent en mars-avril, en juin et en octobre, sur des sols à peu près nus (début des cultures et périodes de sarclage et récolte).

En début de saison humide, les averses battent la surface des sols desséchés parfois pulvérulents, mal protégés par le couvert végétal brûlé, voire totalement dénudés par les défrichements ou le billonnage. En milieu de saison des pluies, ces orages s'abattent sur des parcelles sarclées et gorgées d'eau. Même si le ruissellement ne se produit qu'une fois la saturation du sol assurée, il peut alors provoquer des crues brutales voire des glissements de terrain.

Les coefficients de ruissellement sont faibles du fait de la porosité totale élevée des formations superficielles. L'infiltration est de 50 à 100 mm/h, sur sols d'origine basaltique et, seulement de 9 à 10 mm sur sols granitiques. La grande profondeur des sols basaltiques et l'épais manteau d'altérites qu'ils recouvrent, quelquefois sur plus de trois mètres, absorbent la quasi totalité des eaux de pluie et inhibent le ruissellement. Sur les versants granitiques, la texture sablo-limoneuse et la faible épaisseur des sols autorisent la formation d'une croûte de battance et un ruissellement accru. Par ailleurs, la faible longueur des versants due au vallonnement du relief, réduit la vitesse des écoulements superficiels et par conséquent leur capacité érosive. A peine concentré, le ruissellement s'étale dans les bas-fonds, les marécages ou les bassins d'effondrement.

TYPES D'EROSION ET DE DEGRADATION OBSERVES

Sur les hautes terres de l'ouest, l'érosion dépend initialement de la battance des pluies, et de la présence de sols qui autorisent l'apparition du ruissellement. Mais son efficacité est largement tributaire des techniques d'exploitation du sol.

Dans les zones de polyculture intensive traditionnelle, l'érosion ne s'exerce que faiblement. Seule la technique de confection des billons provoque une érosion mécanique sèche. Toutefois, les terres de bas de versants concaves, les plus anciennement cultivées

montrent des traces d'appauvrissement, signes évidents de la faiblesse des apports colluviaux, de l'importance de l'érosion et de la lixiviation locale. Par ailleurs, les transformations en cours favorisent l'installation du ruissellement et de l'érosion. Les abords des cases et les bas côtés des routes, les cours et les chemins tassés sont soumis à une érosion en rigoles qui s'amplifie à proximité des résidences secondaires et à l'exutoire des canalisations installées par les Travaux Publics sur les voies publiques.

L'exploitation continue des mêmes parcelles entraîne le recours à la fertilisation minérale. Les engrais chimiques (N20-P10-K10, urée et N12-P6-K20), officiellement destinés aux caféières, sont détournés vers les cultures vivrières et maraîchères. Les niveaux de fertilisation sont élevés (250 à 300 kg/ha, sur les parcelles maraîchères du piedmont de Djutitsa), mais on constate un excès d'azote et une insuffisance de potasse (154N 63P 54K pour le café, 147N 72P 72K pour les cultures vivrières et 427N 218P 235K pour les cultures maraîchères) (Ducret & Grangeret, 1986). Sur les sols gravillonnaires des sommets de collines, le maïs présente des carences en azote, potasse et phosphore que les agriculteurs attribuent à l'épuisement de ces sols gravillonnaires qui "ne retiennent pas bien les engrais".

Sur les hauts versants à végétation naturelle conservée, les eaux ruissellent sur le tapis herbacé couché, sans causer de dégâts aux sols même sur fortes pentes. Sur les versants à végétation appauvrie, l'érosion hydrique aréolaire conduit peu à peu au déchaussement de la base des touffes de chaumes et de leurs racines, puis interfère avec le piétinement du bétail qui tasse le sol, pour préparer l'intervention du ruissellement concentré. Quelques sables et graviers peuvent alors être transportés (Morin, 1989).

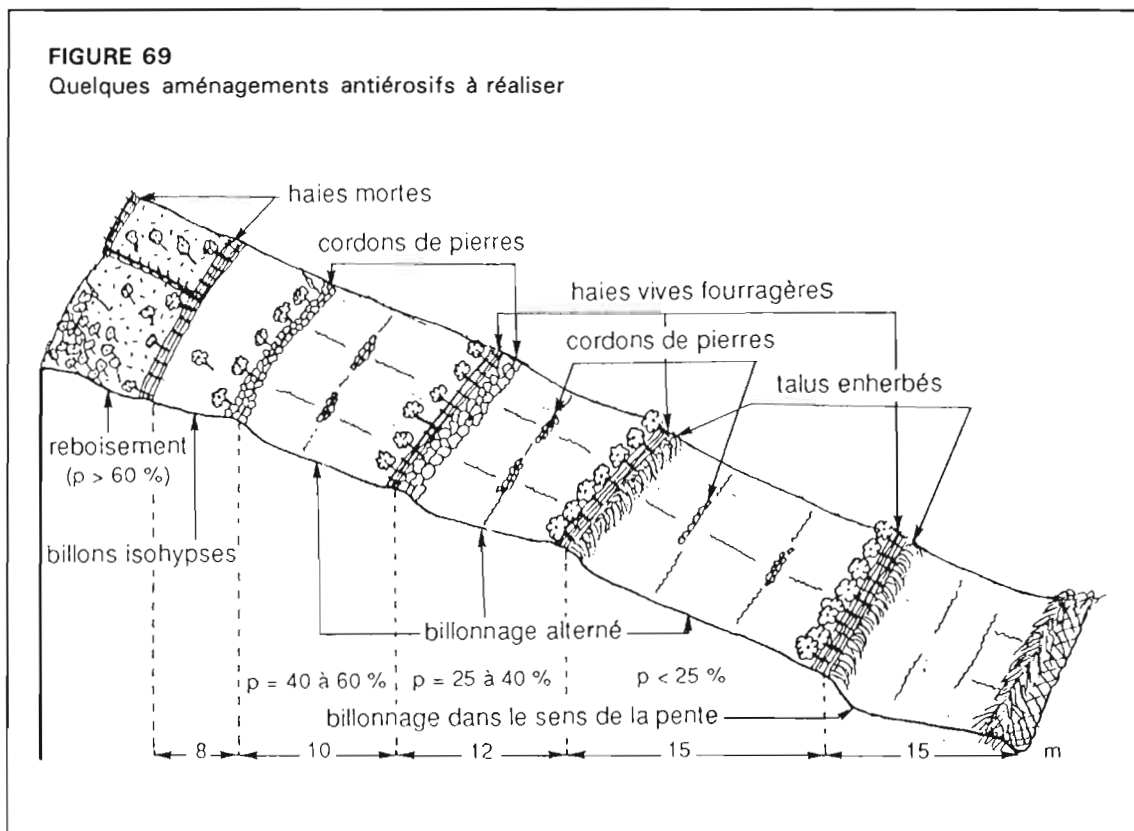
Sur les terres récemment occupées, les pratiques culturales sommaires favorisent la dégradation des sols. Dans les Bamboutos, les écobuages successifs détruisent la structure des sols humifères sur trachytes peu cohérents à l'origine. A Baleng, sur des versants à 25 % de pente, cultivés en billons disposés dans le sens de la pente, Olivry (1974) a mesuré une dégradation de 120 t /ha en trois mois de saison de pluies. Il attribue le débit solide élevé du Mbam pendant toute la saison pluviale à l'apport des particules issues de l'entretien des parcelles des cultures vivrières en pays Bamiléké. Toutefois, ces chiffres demeurent modestes, comparés aux 500 et 700 t/ha/an enregistrés à Adiopodoumé, sous cultures sur des sols ferrallitiques sableux à 22 % de pente (Roose, 1977).

En définitive, la dégradation des sols en pays Bamiléké n'est pas proportionnelle à la pente mais inversement proportionnelle à l'intensification de la culture et du couvert végétal au ras du sol. Une telle situation appelle une réorientation des stratégies actuelles de mise en valeur de l'espace en tenant compte du savoir-faire paysan patiemment accumulé au cours du temps.

QUELQUES PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS

LES AMENAGEMENTS ANTIEROSIFS (figure 69)

La restauration du bocage traditionnel : entretenir les clôtures juridiques et améliorer leur qualités fourragères d'une part, et planter les haies vives fourragères sur les parcelles de culture situées sur des terrains pentus d'autre part. Ces haies vives fourragères de *Leucaena*, *Callyandra callothyrsus* ou *hibiscus fourrager*, seront taillées tous les 3 mois, pour donner



du fourrage au bétail, fumer et pailler les parcelles cultivées, sans réduire de trop la surface cultivable. Renforcées horizontalement de nervures de raphia, elles vont ralentir la vitesse des eaux, arrêter les transports solides et contrôler les déplacements du bétail. On les installera tous les 15 m sur les pentes inférieures à 25 % et tous les 10 m sur les pentes plus fortes. Cet espacement devra tenir compte de la taille des exploitations familiales, de la présence des enclos d'élevage et des clôtures autour des habitations. Des bandes enherbées viendront renforcer ces clôtures vers la partie aval pour renforcer leur efficacité à freiner les transports solides. Une incitation à la généralisation de l'élevage des moutons facilitera la reconversion du bocage.

La disposition des billons sur les versants en fonction de la pente :

□ **Sur des pentes inférieures à 25 % :**

- Des petits billons isohypses, de préférence cloisonnés, au sommet des collines sur des sols peu épais pour faciliter l'infiltration des eaux et éviter la formation du ruissellement. On veillera à ce que les billons se terminent au même endroit afin de créer un couloir de ruissellement privilégié.
- Des billons cloisonnés en bandes tous les 5 mètres, à mi-versant sur les parcelles de polyculture vivrière associée aux caféières. Les différentes bandes de 6 à 8 billons chacune, seront séparées par des haies vives fourragères. Entre 2 bandes

contiguës, un sillon régulièrement paillé et interrompu vers l'aval par un petit cordon de pierres, canalise le ruissellement.

- Des gros billons perpendiculaires à la pente à proximité des talwegs sur des sols épais réservés aux tubercules et cultivés en permanence. Cette disposition évitera des risques de ravinement en cas de fortes averses et, du fait de la couverture continue du sol, freinera l'érosion.
- **Sur des pentes supérieures à 25 % :**
- Des petits billons isohypses cloisonnés du sommet de colline au tiers inférieur des versants. Cette disposition tient compte des contraintes physiques qu'impose le billonnage du sol et nous semble plus efficace que les billons isohypses pour briser la force du ruissellement et faciliter l'infiltration des eaux de pluie.
 - Des billons en bandes alternées vers le bas de versants tous les 5 mètres. Si la couverture pédologique est peu épaisse et riche en éléments grossiers, on évitera le billonnage dans le sens de la pente car les associations culturales dans ce cas sont très réduites et le sol est presque nu en période de fortes averses.

L'édification de petits cordons de pierres. Disposés dans le sens des courbes de niveau à mi-chemin entre les haies vives et de préférence au travers du passage des eaux, ils réduiront la vitesse du ruissellement et partant, freineront l'érosion des sols. Ils seront construits à l'aide des cailloux que les paysannes rassemblent en petits tas dispersés sur les parcelles de culture.

La construction de gros cordons de pierres à l'amont des haies vives tous les 10 ou 15 mètres. Les blocs rocheux qui encombrant les terres agricoles en zone granitique fourniront les matériaux nécessaires à leur élaboration. Ces cordons viendront renforcer les structures antiérosives et, en freinant l'érosion mécanique, ils seront un préalable à la création des terrasses progressives.

Le paillage léger des parcelles de cultures : pratiqué à l'aide des feuilles de bananiers, de palmiers raphias et des tiges coupées sur les haies vives, il est nécessaire sur les parcelles non cultivées pendant la deuxième campagne culturale. Il limite l'évaporation et conserve l'humidité du sol. Les plantes pourront mieux supporter les déficits hydriques de début de saison culturale. Sous caféiers ombragés, il évitera les labours fréquents qui coupent les racines de l'arbre et accélèrent l'érosion mécanique sèche.

Le reboisement par l'eucalyptus associé aux cultures annuelles sur des pentes comprises entre 40 et 60 %. Cette association sera fondée sur un système particulier d'assolement semi-itinérant. Pendant les 2 premières années de mise en place du reboisement, toute la parcelle est labourée et cultivée. De la 3^e à la 6^e année, jachère et cultures alternent tous les ans sur les différentes parties du reboisement. Dès la 6^e année, des éclaircies préparent le renouvellement progressif de la plantation. On contrôle la croissance des arbres en éliminant systématiquement les racines superficielles nuisibles aux cultures. Ils développent alors ses racines pivotantes et contribuent à la stabilité des versants. Ses feuilles à humification lente agissent comme un "mulch" et protègent les sols de la battance, conservent son humidité et ne demandent qu'un labour léger en début de cultures. Dans le périmètre de reboisement des

Bamboutos, des parcelles de pommes de terre, d'ails ou d'oignons prospèrent entre les eucalyptus espacés de 5 à 8 m.

Le reboisement systématique par l'Eucalyptus des pentes supérieures à 60 % avec interdiction de pratiquer toute culture nécessitant un labour. Les arbres doivent être plantés à distance suffisante (3 à 4 m) pour laisser développer un sous-étage protecteur du sol contre la battance. Il peut servir de parcours éventuellement lorsque les arbres ont plus de 2 m de haut. Si les versants reposent sur un plan de glissement, les eucalyptus, exploités en taillis tous les 5-7 ans assèchent progressivement la nappe souterraine et stabilisent les pentes. Cet arbre fournit aussi une part importante de bois de chauffe, de bois d'oeuvre et procure des revenus substantiels (Fotsing, 1992a).

LA RESTAURATION DE LA FERTILITE DES SOLS

L'utilisation rationnelle des engrais minéraux et la commercialisation des fertilisants appropriés compensera les carences en potasse et phosphore. Le labour permettant l'enfouissement de P et K avant le semis, des apports de N en cours de végétation, seront certainement profitables et moins coûteux : le 20 - 10 - 10 fournit des unités de P_2O_5 et de K_2O plus chères que les autres produits.

L'amélioration de la jachère par l'introduction des légumineuses semées en dérobé sous la dernière culture après sarclage, facilitera la reconstitution des éléments fertilisants des parcelles au repos. Leur exploitation en pâturages pour le petit ruminant permettra de valoriser le fumier laissé par les animaux.

L'amélioration des méthodes d'élevage. Pour le petit bétail, elle consistera à déplacer rationnellement les piquets d'attache afin d'éviter la surexploitation des mêmes secteurs. Pour le gros bétail, il faut instituer un système en semi-stabulation à proximité des campements, et un système de pâturages tournants couplé à une courte transhumance de saison sèche sur l'ensemble du territoire pastoral.

La construction de citernes pour une meilleure gestion des eaux en saison sèche. Dans les zones de fortes densités du bâti, elle piègera l'eau des toits, des cours d'eau et des chemins. Cette réserve d'eau sera utilisée pour les travaux de confection des briques, permettra une irrigation d'appoint des jardins potagers en contre-saison, la pratique de l'irrigation observée chez certains maraîchers de Bafou et l'abreuvement du bétail. Ceci évitera aux pasteurs le recours à la transhumance de saison sèche qui favorise l'invasion des pâturages par les cultivateurs (Fotsing, 1988).

L'intégration de l'agriculture et de l'élevage dans les zones montagneuses après délimitation précise des aires d'influence de chaque activité. Le fumier des lieux de stabulation des troupeaux fertilisera les parcelles cultivées et la mise en défens d'une portion du territoire pastoral facilitera le recru fourrager. Le bétail pourra aussi exploiter les résidus de récoltes des champs cultivés.

La construction des compostières-fumières-poubelles. Dans les zones habitées, cette pratique pourra se généraliser à partir des trous d'où l'on extrait la terre pour les briques de cases. Les déchets de cuisine, les cendres domestiques, la pulpe et la parche de café, les

drèches de brasserie, les résidus des élevages hors-sol, les stipes de bananier y seront entassés et se décomposeront lentement à l'ombre des arbres des alentours des habitations. Les déchets à humification lente seront laissés sur place tandis qu'une partie de la fumure organique transportée sur les champs facilitera la généralisation du maraîchage. Dans les zones d'élevage extensif, elles seront construites au contact des terroirs pastoraux et les terres agricoles. Ainsi, le fumier ramassé sur les parcours mélangé à la paille séchée constituera un apport important en fertilisants organiques. Cette technique réduira la pratique des feux de saison sèche qui exposent les sols au ruissellement et à l'érosion.

Quelques mesures d'accompagnement viendront compléter ces propositions d'amélioration. Nous pensons d'abord à la réorganisation du marché des engrais ainsi que de l'ensemble des circuits d'approvisionnement et de commercialisation des produits. Ceci permettra à tous d'accéder aux intrants et d'écouler plus facilement leur production. La création des "banques d'engrais" de quartiers, relais entre les associations paysannes et les coopératives agricoles est une nécessité fondamentale (Fotsing, 1992). Enfin, la refonte générale du système foncier est impérative pour donner aux paysans la "sécurité foncière" indispensable à toute oeuvre durable.

CONCLUSIONS

Devant la menace persistante d'érosion et de dégradation des sols en pays Bamiléké, les initiatives concertées des pouvoirs publics se sont soldées par des réussites mitigées. Le faible engouement des paysans pour les aménagements antiérosifs proposés relève avant tout d'une profonde inadéquation entre les propositions et la logique paysanne d'exploitation du sol. Or les formes de dégradation des sols aujourd'hui observées sont une réalité que les systèmes actuels ne peuvent plus freiner. Pourtant, les techniques traditionnelles relativement efficaces ne demandent qu'à être améliorées puisqu'elles sont bien inféodées au milieu et tiennent compte de la place centrale de la femme dans le processus de la production agricole. C'est ainsi que nos propositions s'inspirent largement des savoir-faire locaux. Bien appliquées, elles peuvent préserver encore pour longtemps, les potentialités agricoles de cette région.



Chapitre 11

L'agroforesterie, la fertilisation minérale et la GCES au Rwanda

ATTEINDRE L'AUTOSUBSISTANCE ALIMENTAIRE DANS UNE REGION DE MONTAGNE TROPICALE A FORTE DENSITE DE POPULATION

PROBLEMATIQUE

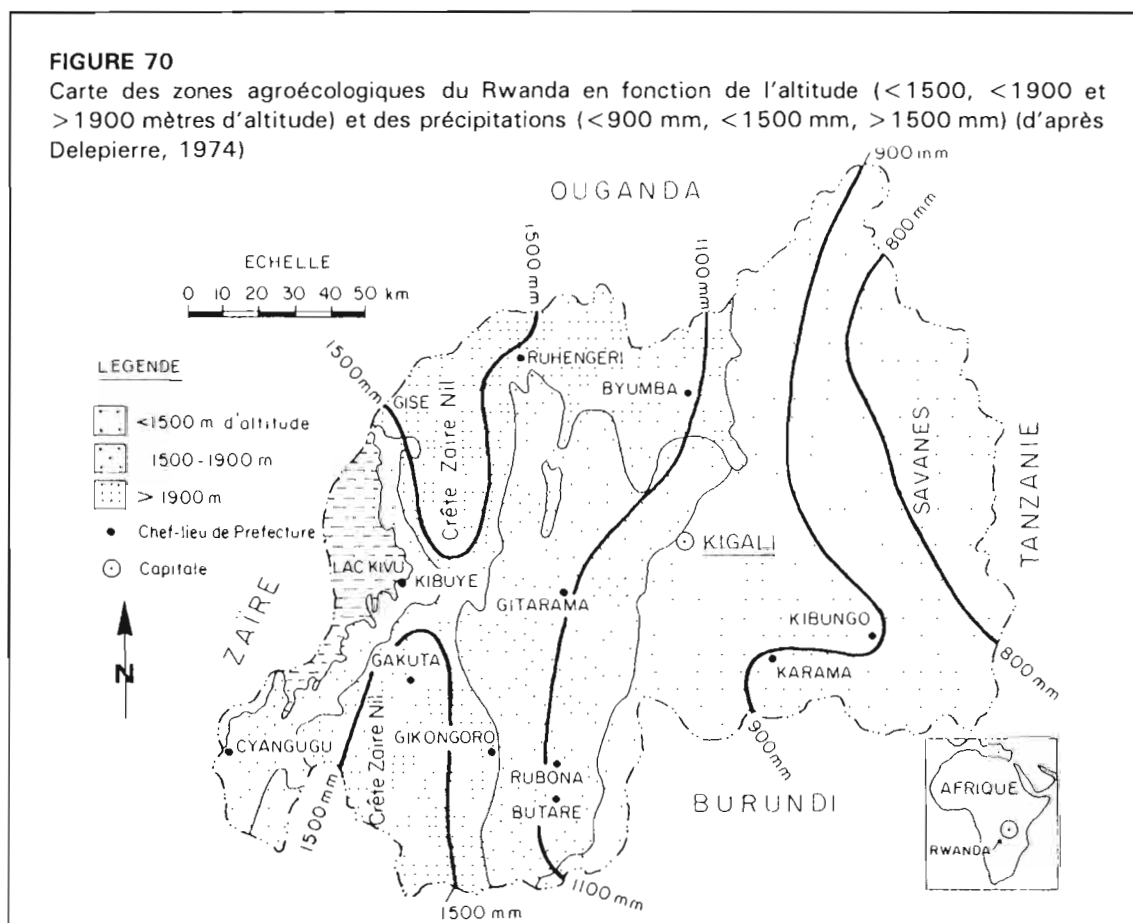
Le Rwanda est un petit pays (26 000 km²) montagneux (altitude : 900 à 4200 m), isolé en Afrique Centrale à plus de 1 000 km de l'Océan Indien et 2 000 km de l'Atlantique.

Pays aux mille collines, le Rwanda présente des paysages très variés. On y distingue six zones bioclimatiques principales en fonction du soubassement géologique et des formes de paysage, de la densité de population, des cultures et surtout des précipitations qui augmentent avec l'altitude (Delepierre, 1974 ; Gasana, 1990) (voir figure 70).

Ce pays a connu récemment une très forte croissance démographique : la population du Rwanda était estimée à 1 million d'habitants au début du siècle, 2,6 millions à l'indépendance (1962), 8 millions en 1992 et dépassera 10 millions vers l'an 2000. Le taux de croissance est l'un des plus élevés du monde (3,7 %) : la population double en 17 ans ! La croissance économique ne peut plus suivre la croissance démographique : la population paysanne a dépassé les limites de la pauvreté. Comme ce pays n'a presque plus de réserve foncière, la taille moyenne des exploitations diminue dangereusement : elle est inférieure à 0,8 hectare et plus de 25 % des familles doivent survivre sur moins de 0,4 ha.

Trois communautés vivent dans ces paysages tropicaux d'altitude : les artisans (5 %), les agriculteurs (85 %) et les éleveurs (10 %). Les agriculteurs, les plus nombreux, cultivaient les versants des collines de moyenne altitude, tandis que les éleveurs s'établissaient sur les sommets en saison des pluies et exploitaient les bas-fonds en saison sèche. Sous la pression démographique, l'agriculture a envahi rapidement toutes les terres cultivables tandis que l'élevage des grands troupeaux de bovins était refoulé dans les savanes de l'est ou sur les hautes terres (Crête Zaïre-Nil et volcans). En outre, 50 % des ménages d'agriculteurs possèdent aujourd'hui quelques caprins/ovins et 30 % ont une ou deux vaches. Avec des

Eric Roose
Directeur de Recherche en Pédologie, ORSTOM, Montpellier, France
François Ndayizigiye
Géographe chercheur, ISAR, Station Rubona, Rwanda



exploitations de 0,4 hectare, il n'est plus possible de développer l'élevage et la culture fourragère : la jachère est sur le point de disparaître et les pâturages sont restreints aux abords des chemins et aux bosquets privés ou communaux. On tend inexorablement vers un élevage de petits animaux en stabulation quasi permanente (chèvres, cochons, poules). Ceci pose le problème de la fumure des terres jusqu'ici assurée par le fumier de bovins : déjà, la disponibilité en fumier ne permet plus d'entretenir la fertilité que sur 30 % du terroir (Roose *et al.*, 1991). Il va donc falloir intensifier la fumure organique (stabulation) et faire appel à un complément minéral et au paillage.

Le problème majeur de ce pays à vocation agricole (plus de 90 % de sa population vit de l'agriculture), sans grande ressource minérale ni commerciale, est d'assurer l'autosuffisance en aliments et en bois à la population très nombreuse (150 à plus de 800 habitants/km²), sans dégrader les paysages formés de grosses collines allongées.

Parce que les situations sont très variables au Rwanda, du point de vue des risques d'érosion, nous n'aborderons pas la zone volcanique (1/3 du territoire) ni la bordure du lac Kivu, ni la Crête Zaire-Nil où les risques de glissement de terrain sont d'autant plus élevés que les pentes sont raides, les pluies abondantes (jusqu'à 2 000 mm) et les secousses sismiques fréquentes. Nous nous limiterons à présenter les résultats obtenus sur le plateau central (dans la région de Butare) et dans la zone basse des savanes de l'Est (Karama).

DIAGNOSTIC DU MILIEU

Du point de vue des risques d'érosion, les deux zones choisies diffèrent sérieusement.

- **La zone des plaines basses** (alt : 900 à 1500 m), couverte de savanes arbustives, reçoit 800 à 1000 mm de pluie par an au cours de deux saisons humides. C'est une zone moins accidentée (pentes inférieures à 15 %), moins arrosée et moins peuplée (malaria et diverses maladies tropicales) et par conséquent, moins exposée aux risques d'érosion que le reste du pays. La majeure partie de l'est de cette zone est actuellement vouée à l'élevage extensif, bien que les sols soient souvent assez fertiles. Les sols ferrallitiques ou ferrugineux y sont moins acides et moins désaturés qu'ailleurs, mais les pluies y ruissellent plus facilement (croûte de battance) et les cultures souffrent chaque année de l'irrégularité et du déficit pluviométrique. La gestion des eaux superficielles est probablement le problème majeur du développement agricole de cette zone : les pertes par érosion et par drainage sont modérées.
- **Le plateau central** (alt. : 1500 à 2000 mètres) reçoit entre 1200 à 1500 millimètres de pluie en dix mois. L'érosivité des pluies (R_{USA} de 250 à 500 unités) est importante et la population agricole très dense (250 à 800 habitants/km²) est obligée de cultiver toutes les terres, y compris les pentes de plus de 40 % sur les flancs des collines convexes.

Durant la première saison (septembre à décembre), les pluies sont fines et deux fois moins énergétiques qu'en Afrique occidentale (Roose *et al.*, 1991) : elles tombent sur un sol sec, bien drainant, bien travaillé manuellement et font assez peu de dégâts. Par contre, en deuxième saison (février à juin), on observe quelques averses intenses et plus importantes (60 à 100 mm/jour) : si elles tombent sur des sols humides, des champs en forte pente ou finement préparés pour recevoir les semences, elles forment des rigoles qui décapent toute l'épaisseur du sol cultivé sur toute la longueur de la parcelle. Ces masses de terre colmatent facilement les fossés antiérosifs, qui débordent : le ruissellement accumulé dans les fossés creuse alors des ravines qui vont détruire l'aménagement antiérosif jusqu'au bas du versant.

L'horizon humifère est rapidement décapé, non seulement par l'érosion en rigole, mais aussi par l'érosion mécanique sèche, suite aux nombreuses façons culturales : deux labours profonds (pour enfouir les adventices) et deux sarclages à chaque saison culturale entraînent 30 à 60 tonnes de terre à migrer le long du versant jusqu'au premier obstacle, de telle sorte que les talus croissent de 15 à 30 cm par an.

A ce régime, la couverture pédologique des sommets des collines est vite éliminée et laisse apparaître les altérites et des blocs de roche. Le réservoir d'eau qu'elle constitue diminue : lors des séquences pluvieuses importantes, des masses d'eau dévalent de ces sommets dégradés et ravinent les versants, modifient le rythme des rivières, augmentent les débits de pointe, attaquent les berges et charrient les galets qui tapissent le fond des rivières. L'équilibre précaire de ces montagnes est rompu par les défrichements abusifs, le surpâturage, les cultures peu couvrantes sur des pentes affolantes et l'exploitation, pour les constructions, des pierres qui protègent le fond des rivières.

Les sols ferrallitiques sont généralement très désaturés, acides (les pH 5 à 4 sont fréquents), carencés en P et N et pauvres en bases. Ils semblent très perméables en général, sauf s'ils sont localement tassés (pistes, chemins de bétail, cours d'habitation) ou battus par

TABLEAU 40

Erosion (t/ha/an) et ruissellement (% des pluies annuelles) sur petites parcelles (5 x 20 m) sur des sols ferrallitiques à pente forte (25 à 60 %) au Rwanda et au Burundi (d'après les résultats de ISAR à Rubona (Ndayizigiye 1988-93, du PASI à Butare (König, 1991), de l'IRAZ (Rishirumuhirwa, 1992) et de l'ISABU (Duchaufour et Bizimana, 1992))

Couvert végétal	Aménagement	E t/ha/an	Ruissellement KRAM %
Sol nu	cultivé dans le sens de la pente	300 à 550	10 à 40 %
Manioc ou patates, maïs/haricots ou pois-sorgho en cultures associées	traditionnel à la houe	50 à 150 (300)	10 à 37 %
Cultures + idem + 200 arbres/ha	litière 50 kg/arbre/an	30 à 50 (111)	5 à 7 %
Idem + arbres + haies vives tous les 5 à 10 m	biomasse de 3 à 6 kg/m/an	an 1 : 7 à 16 an 4 : 1 à 3	10 à 15 % 1 à 3 %
Idem + arbres + haies vives	+ billons couverts tous les 5 mètres	1 à 4	0,1 à 2 %
Bananeraie	ouverte, paillis exporté (10 t/ha/an)	20 à 60	5 à 10 % (45)
	ou complète, paillis étalé ou en cordons	1 à 5	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

les pluies. Ces sols retiennent peu l'eau (1 mm d'eau disponible par centimètre de sol) et les nutriments (1 à 5 méq/100 g de terre fine) : d'où l'importance de maintenir un taux de matières organiques suffisant. Ils sont souvent rajeunis par l'érosion avec une nappe de gravats ou de graviers ferrugineux entre 30 et 100 cm de profondeur. L'érodibilité des sols est faible (à moyenne sur schiste) : l'indice K de Wischmeier est généralement inférieur à 0,20 (Roose et Sarrailh, 1989 ; Ndayizigiye, 1993).

En dehors des deux périodes de plantation, les paysages sont verdoyants car les pluies sont réparties (bien qu'irrégulièrement) sur toute l'année. Les risques d'érosion seraient donc modérés si les pentes cultivées n'étaient pas aussi raides (Berding, 1991). Au cours de deux enquêtes dans l'ensemble du pays, il est apparu que 50 % de terres cultivées ont plus de 18 % de pente, 20 % ont plus de 40 % de pente, 5 à 6 % ont plus de 65 % (limite des terrasses) et 1 % des terres a plus de 84 % de pente.

Deux phénomènes viennent aggraver localement les risques d'érosion :

- **Les problèmes fonciers :** Lors d'un héritage, par soucis d'équité, chaque héritier reçoit une part égale de chaque terre, ce qui revient à découper la parcelle originale en autant de lanières verticales qu'il y a d'héritiers. Il en résulte que sur les collines à forte densité de population (installation ancienne), des parcelles étroites et très longues sont mises en culture au même moment, ce qui aggrave sérieusement les risques d'érosion en nappe décapante jusqu'en bas du versant. Une fois ce décapage amorcé, il se répète d'année en année aux mêmes endroits car il est difficile d'empêcher le ruissellement de rejoindre les points bas du champ. La terre est rapidement ruinée. Le droit foncier devrait être modifié.
- **Les glissements de terrain :** Lors d'une campagne d'aménagement d'une colline, lorsqu'on creuse des fossés d'absorption totale sur des pentes de plus de 40 % ou sur des sols peu profonds sur une altérite glissante (schiste, gneiss, roche micassée ou cendres volcaniques sur dômes granitiques), on déséquilibre le versant. Il arrive qu'à la fin d'une longue série d'averses (surtout s'il y a des secousses sismiques), la couverture pédologique gorgée d'eau glisse à partir d'un de ces fossés jusqu'à la rivière que la masse de terre peut barrer temporairement.

Les résultats expérimentaux démontrent combien il est urgent de combiner toutes les méthodes antiérosives disponibles pour stabiliser les terres sur les versants, mais aussi pour augmenter substantiellement leur productivité (voir tableau 40).

On dispose d'environ 250 mesures fiables d'érosion annuelle à l'échelle de parcelles de 100 m² (20 m de longueur) assez voisines des champs paysans, réalisées sur des pentes fortes (25 à 60 %) (sauf pour les bananeraies de l'IRAZ où $p = 8 \%$) sur des sols ferrallitiques plus ou moins rajeunis ou colluvionnés, très désaturés et acides, mais résistant bien à l'agressivité des pluies ($K < 0,2$ à $0,1$). De ces résultats expérimentaux il ressort :

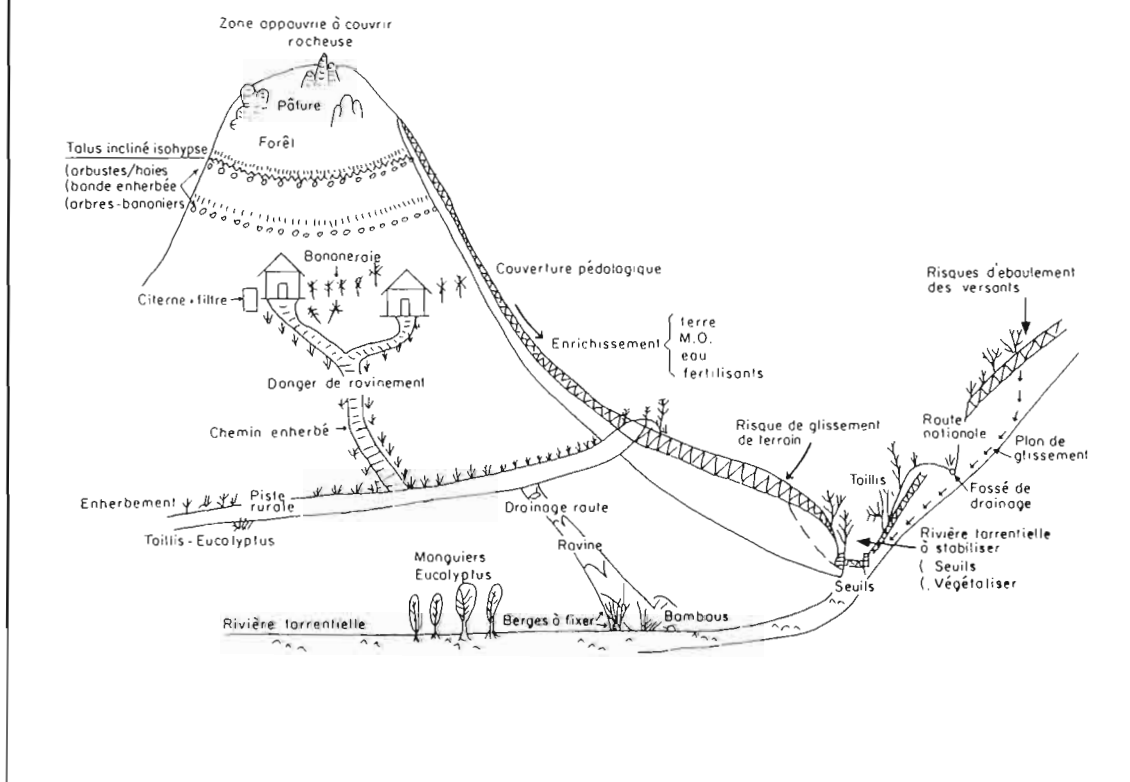
- que les risques d'érosion en nappe plus rigole sont très élevés sur les sols nus : ils varient de 300 à 550 t/ha/an, beaucoup plus en fonction des averses que de la pente ; il suffirait donc de 5 à 10 ans pour décaper l'horizon humifère (20 cm) ;
- que les risques de ruissellement ($KRAM = 10$ à 40%) peuvent être graves sur ces pentes fortes lorsqu'elles sont mal couvertes (cas des sols dégradés) ;
- que les méthodes culturales et les associations traditionnelles réduisent déjà sérieusement les risques ($C = 0,2$ à $0,5$), mais pas suffisamment puisque la tolérance ne dépasse pas 1 à 12 t/ha/an selon la profondeur des sols ;
- que les arbres dispersés dans les cultures améliorent peu la conservation des sols ;
- que les haies vives d'herbes ou de buissons disposés tous les dix mètres, complétées par un gros billon couvert de légumineuses ou de patates douces tous les cinq mètres présentent une première solution valable ;
- que le paillage (testé sous bananeraie, café ou manioc) est une seconde solution directement efficace même sur pentes fortes ;

FIGURE 71

Six processus aboutissent à la dégradation du milieu rural (d'après Roose, 1992)

Colline quartzite/schiste

1. Dégradation des sols :
 - Matières organiques → Infiltration →
 - Fertilité →
 2. Erosion en nappe + rigoles
 3. Erosion mécanique sèche : creeping
 4. Ravinement (pistes)
 5. Glissements de terrain
 6. Divagation des torrents
- } Décapage horizon humifère
} Responsabilité paysanne
} Accidents graves en aval (boue, inondation)
} Responsabilité de l'Etat



- que la reforestation en pin (la litière d'aiguilles est très efficace), ou en d'autres espèces sylvoles admettant un sous-étage, réduisent très vite le ruissellement et l'érosion à des propositions acceptables (Roose, Ndayizigiye, Sekayange, 1992).

Les fossés aveugles et les terrasses radicales ne peuvent être étudiés valablement sur ces petites parcelles (5 mètres de large). Sur les terrains aménagés par les projets de LAE, on a observé que ces méthodes peuvent augmenter les risques de ravinement et de glissement de terrain sur les couvertures pédologiques peu épaisses ou trop pentues ($p > 40\%$).

Ce ne sont pas les structures antiérosives seules, mais les systèmes de culture, qui jouent le rôle principal dans la stabilisation des versants.

En conclusion, ces paysages verdoyants peuvent donner l'impression d'être stables à certains experts pressés, habitués aux terres ravinées et dénudées des régions semi-arides. En réalité, les sols sont très pauvres, des pentes très fortes (60 à 100 %) sont cultivées par nécessité (manque de terre), les pluies sont surabondantes à certaines époques et trop espacées à d'autres, le couvert végétal offert par les cultures sur les terres les plus dégradées est trop léger pour protéger le sol des divers processus d'érosion en action sur les collines du Rwanda (voir figure 71).

LES METHODES TRADITIONNELLES

Les cultures sont réparties autour de l'habitat (dispersé sur les collines) en relation directe avec la fertilisation des sols. Quand un jeune ménage a installé son habitat sur une plateforme taillée dans la colline, il plante tout autour sa bananeraie qui va recevoir la majeure partie des nutriments disponibles (déchets familiaux, résidus de culture, cendres, épiluchures et latrines). Entre les bananiers, poussent les cultures vivrières associées : maïs, haricots, colocases, patates et condiments. Un petit champ de maïs associé aux haricots reçoit un peu de fumier/compost ; le sorgho semé à la volée, y pousse en deuxième saison.

Les seules parcelles non érodées sont les parcelles paillées sous caféier. En effet, pour éviter les amendes consciencieusement distribuées par les encadreurs du Ministère de l'Agriculture, la parcelle de café (un ou deux ares) est paillée abondamment avec les tiges de manioc, de sorgho, diverses herbes arrachées aux talus et des feuilles de bananier. Les terres restantes (2/3) ne reçoivent ni fumier, ni engrais, et se dégradent forcément sous des cultures très frugales comme le manioc et les patates douces.

Les adventices sont soigneusement arrachées lors du sarclage, soit pour nourrir les bêtes à l'étable, soit pour couvrir les sillons et réduire l'érosion, soit elles sont entassées en gros tas couverts de terre et aussitôt plantés de boutures de patates douces... selon les saisons et les besoins. De toute façon, le recyclage des végétaux est très rapide.

Les parcelles sont dispersées parfois à plusieurs kilomètres de l'habitat (champs loués). Les inconvénients sont nombreux (perte de temps en parcours, difficulté de garder et de fumer), mais la dispersion des champs permet aussi de faire face aux risques climatiques (orages et grêle localisés, dégâts dus aux animaux et aux maladies). Les jeunes technocrates rêvent d'habitat concentré dans des villages et de remembrement des terres pour lancer une agriculture intensive, moderne et motorisée. C'est une grave erreur dans un pays ne disposant d'aucune alternative (ni industrie, ni voie d'eau internationale, ni commerce) pour nourrir l'abondante population rurale rejetée des campagnes. De plus, les terres sont trop pentues pour risquer d'y introduire les tracteurs (rentabilité peu probable, risques de tassement) et ce qui fait la richesse des terres actuellement (déchets familiaux) deviendra un polluant bien difficile à gérer à l'échelle d'un village.

Les techniques culturales exigent beaucoup de travail et sont souvent réalisées par des groupes de voisins à l'aide de deux outils élémentaires : la matchette (parfois recourbée en faucille) et une houe à long manche. Après une courte jachère (quelques mois à un ou deux

ans), les sols envahis par les herbes sont nettoyés superficiellement puis labourés profondément pour enfouir l'herbe (à 30 cm et plus). Les stolons et autres racines persistantes sont séchées en tas et compostées ou brûlées. Un mois plus tard, la parcelle est retravaillée finement pour le semis en poquets (maïs) ou à la volée (sorgho de deuxième saison) ; un deuxième semis d'une culture associée peut intervenir après le premier sarclage pour remplacer les poquets manquants et couvrir toute la surface.

Tout est travaillé manuellement à la houe. La traction animale, difficile sur les fortes pentes, n'intéresse personne : ce n'est pas la coutume de faire travailler les animaux. Il n'existe pas de motorisation (hors de prix à de telles distances de la mer), si bien qu'on observe peu d'horizon tassé en profondeur et que le drainage semble s'effectuer normalement. Seules, les zones de source mériteraient un drainage profond.

La formation de billons ou de grosses buttes est limitée à la culture des tubercules et à l'enfouissement des adventices. Dans les vallées et les marais par contre, la culture sur planches surélevées ou sur grosses buttes est la règle générale pour assurer un bon drainage.

En dehors de l'épandage de fumier dans les champs proches de l'habitat, la conservation de la fertilité des sols est assurée par les associations culturales, les rotations, l'enfouissement des adventices et la jachère courte. Il existe cependant, une technique de lutte antiérosive traditionnelle réservée aux très fortes pentes, en particulier pour la culture du pois sur schiste et sur les hautes terres du nord et de la Crête Zaire-Nil (Nyamulinda, 1989). Il s'agit de terrassettes ou microterrasses en escalier d'un mètre de largeur, taillées dans le versant tout en préservant le système racinaire des touffes d'herbes. Ceci permet de dégager l'espace nécessaire à une double ligne de maïs/haricot ou de petits pois. Le talus (de 0,5 à 1 mètre de hauteur) est solidement maintenu en place par le réseau racinaire des graminées. L'intérêt majeur de ces terrasses étroites, c'est de maintenir la planche cultivée dans l'horizon humifère alors que plus les terrasses sont larges et plus on perturbe l'organisation du sol et on met à nu les horizons profonds stériles (Roose *et al.*, 1992). Dans la technique traditionnelle, on bascule la moitié de la planche du haut sur celle du bas en deuxième année... ce qui revient à déplacer mécaniquement la couche superficielle du sol tout au long du versant. Des essais en parcelle d'érosion ont montré que cette méthode améliorée (c'est-à-dire en cultivant les planches en courbe de niveau et en exploitant les herbes du talus) permet d'arrêter toute érosion et de gérer au mieux les eaux de pluie, même sur des sols schisteux sur des pentes de 60 % (Ndayizigiyé, 1993 ; Nyamulinda *et al.*, 1992).

Enfin, on peut observer localement une technique de gestion des eaux ruisselant sur les chemins : il s'agit de creuser une fosse en haut de pente où l'on dirige le ruissellement et sa charge sédimentaire. Dès que la fosse est à moitié pleine de sédiments, on y plante une touffe de bananiers qui profitent de ces apports d'eau et de nutriments. Quand la première fosse est presque pleine, on en creuse une plus bas (= Rudumburi).

En conclusion, les méthodes traditionnelles ont permis de maintenir la stabilité du paysage et un niveau modeste de production. Maintenant que la population est devenue trop dense pour maintenir suffisamment de terres en jachère, il s'agit d'intervenir pour maintenir les terres en place, mais aussi pour augmenter rapidement leur productivité (à la fois en vivrier et en bois de chauffe).

PROPOSITIONS POUR LA GESTION DES EAUX DE SURFACE

ADAPTATION A CHAQUE REGION CLIMATIQUE

En région semi-aride (en particulier les Savanes de l'Est), la mise en culture entraîne une forte augmentation du ruissellement à la parcelle et une réduction de l'évapotranspiration... donc de la production de biomasse. Par conséquent, l'impact de la lutte contre le ruissellement (amélioration de l'infiltration en stockage localisé) peut être considérable en zone semi-aride sur les rendements des cultures qui souffrent autant de sécheresse que de carences minérales : les agriculteurs seront vite intéressés par les techniques de gestion du ruissellement.

En région humide ($P > 1000$ mm), le défrichement et la mise en culture entraînent une augmentation des risques de ruissellement, des débits de pointe des rivières et donc des risques d'érosion des berges. Par conséquent, on observe une réduction du drainage, de la lixiviation des engrais... et du débit d'étiage des sources et des rivières. La lutte contre le ruissellement (et l'érosion) aura donc relativement peu d'effet sur les rendements des cultures, sauf s'il existe des périodes de sécheresse aux périodes sensibles du cycle de croissance. C'est là une des causes du manque d'effet sur les rendements de la lutte antiérosive dans les collines humides du Rwanda : les autres causes sont la pauvreté chimique et l'acidité des sols.

En conclusion, si on réduit le ruissellement par les techniques culturales et/ou les structures antiérosives appropriées, il est nécessaire d'intensifier la production végétale si on veut éviter d'augmenter les risques de lixiviation des nutriments dans les eaux de drainage et les risques de glissement de terrain sur les fortes pentes : d'où l'intérêt des cultures associées, de la fertilisation et de l'agroforesterie.

LES STRUCTURES DE GESTION DE L'EAU ADAPTEES AU RWANDA

On peut définir quatre modes de gestion des eaux de surface 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 (Roose, Ndayizigiye, Sekyange, 1992). Nous ne citerons ici que les plus adaptées.

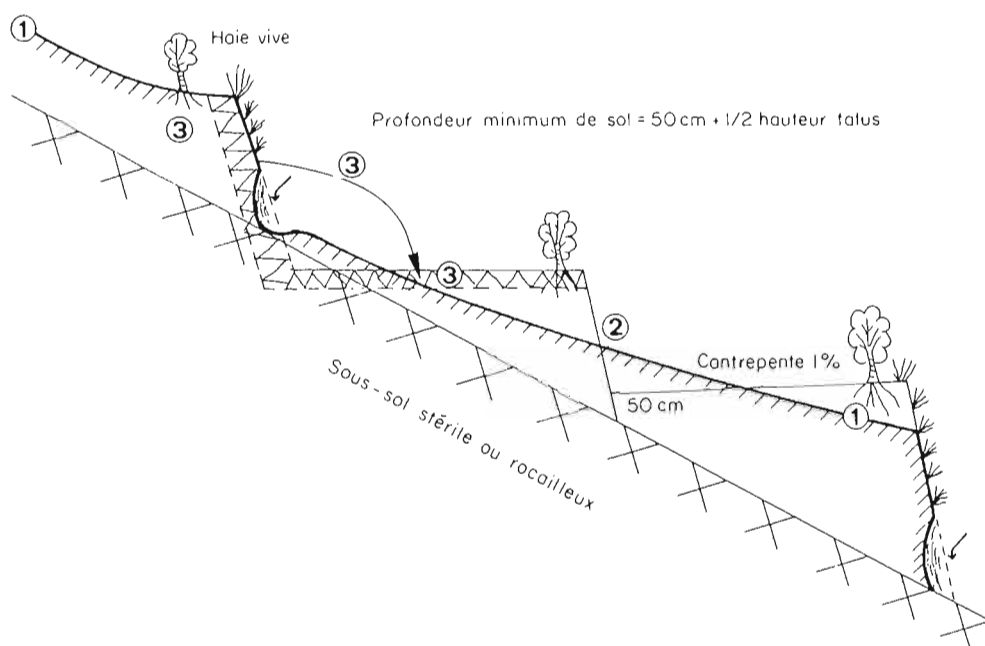
Les citernes d'eau potable collectant 10 à 50 m³ d'eau propre venant des toits réduisent considérablement les corvées d'eau, améliorent le niveau d'hygiène et permettent un petit élevage en stabulation, la production de fumier et la création d'un jardin multiétagé très intensif autour des habitations.

Les citernes ou mares collectant les eaux de ruissellement (100 à 500 m³) sur les pistes, les versants rocheux ou surpâturés permettent l'abreuvement d'un troupeau et l'irrigation d'appoint de cultures potagères et fruitières de courte saison (voir Haïti).

Les fossés d'absorption totale favorisent l'infiltration des eaux de ruissellement sur les versants de moins de 20 % de pente sur sols profonds et perméables. Ils exigent malheureusement beaucoup de travail (200-350 jours à l'installation, plus 20 à 50 jours par an pour l'entretien) et n'améliorent guère les rendements des cultures (d'où l'abandon par les paysans). Leur principal intérêt réside dans la transformation progressive du paysage en

FIGURE 72

Evolution des terrasses progressives en terrasses horizontales. Proposition du projet CIGAND (d'après Galliker, 1992)



- (1) On trouve actuellement sur les collines, de nombreuses terrasses progressives, trop larges entre des talus trop redressés ou même creusés à la base. Après 5-7 années d'évolution, la partie aval de la terrasse s'est engraisée en terre fine, mais la partie amont s'est décapée et tend à devenir stérile : il faut intervenir.
- (2) Trouver dans la terrasse la ligne où apparaît le sous-sol stérile ou la roche à environ 1,3 mètre (50 cm + 1/2 dénivélé du talus), planter une nouvelle ligne de graminée et construire un talus incliné à 40 % couvert d'herbes + légumineuses fourragères.
- (3) Pour éviter que la terrasse amont soit stérile après les travaux de planage, on peut abattre une dernière fois le mur du talus amont pour lui rectifier sa pente et recouvrir la terrasse amont d'une couche humifère suffisante.

terrasses peu pentues. Les fossés de diversion sont à proscrire en montagne, car ils aboutissent forcément au ravinement des exutoires.

Les microbarrages perméables (cordons d'herbes, de pierres, haies vives, talus enherbés) n'arrêtent pas le ruissellement, mais ralentissent les eaux, dissipent leur énergie et les étalent en nappe en provoquant le dépôt des sédiments. Il se forme rapidement un talus (20 à 30 cm par an) et une terrasse progressive que l'on peut transformer en deux terrasses horizontales (gradin) : l'une enrichie (réservée à la culture intensive), et l'autre appauvrie (cultures frugales comme le manioc et les patates douces) dont il faut restaurer la fertilité progressivement (voir figure 72). Le travail est plus progressif (50 jours à l'installation, plus 10 jours/an d'entretien) ainsi que le besoin en fertilisants.

Les gradins horizontaux (terrasses radicales) permettent d'absorber toutes les eaux (pluie + ruissellement entre terrasses) et de capitaliser la fumure qu'on y accumule. Mais il doit être clair que la terrasse radicale exige de gros investissements en travail (500 à 1200 jours par ha à l'installation) et en intrants (10 t par ha de fumier, 1 à 5 t par ha de chaux, plus la fumure propre à chaque culture) avant de restaurer la fertilité naturelle du sol. Il ne faut donc choisir cette méthode que si l'on dispose des intrants et des moyens de valoriser le surplus de production (marché et routes praticables), et si les risques de glissement de terrain sont exclus.

Les microterrasses en escalier (largeur cultivée d'environ un mètre) sur talus enherbés fixés (maximum 50-100 cm) exigent beaucoup moins de travail et stabilisent très bien les versants raides en cas de culture manuelle associée car les racines des cultures restent dans l'horizon humifère d'origine.

LES TECHNIQUES CULTURALES LES MIEUX ADAPTEES

Les techniques culturales qui modifient l'état de la surface du sol, sa rugosité, sa couverture végétale, les activités de la mésofaune et/ou sa capacité d'infiltration, sont souvent très efficaces pour réduire le volume ruisselé et dissiper son énergie.

Le labour à plat en grosses mottes est indispensable sur les sols trop tassés. Il augmente temporairement l'infiltration, améliore le stockage de l'eau et aide à enfouir les résidus de culture et à lutter contre les adventices. Malheureusement, il ralentit l'activité des vers de terre, réduit la cohésion du matériau et augmente son érodibilité par les eaux de ruissellement surtout lorsqu'on sème sur un lit d'agrégats très fins.

Le buttage et le billonnage, parallèlement à la pente, accumulent localement la bonne terre humifère permettant de produire de gros tubercules, mais ces pratiques sont dangereuses sur forte pente car elles concentrent le ruissellement en filets capables de creuser des rigoles et des ravines et d'arracher les graviers et autres cailloux protégeant de la battance des pluies.

Le billonnage cloisonné perpendiculaire à la pente améliore le stockage de l'eau lors des petites averses, mais peut donner lieu à du ravinement ou à des glissements de terrain lors des plus fortes averses. Seuls, de **gros billons (H = largeur \geq 40 m) protégés en permanence** par une végétation rampante (ex. patates douces ou légumineuses fourragères) à moins de cinq mètres d'écartement peuvent casser l'énergie du ruissellement sur les

versants. L'association avec des haies vives permet de stabiliser rapidement les versants raides (de 20 à 60 %).

PROPOSITIONS POUR LA GESTION DE LA FERTILITE DES SOLS

GESTION DE LA BIOMASSE

Au Rwanda, la majorité des paysans est trop pauvre pour acheter assez d'engrais minéraux pour intensifier la productivité de toutes leurs terres. Traditionnellement, pour maintenir ou restaurer la productivité de leurs champs, ils ne disposent que de la biomasse produite sur leurs champs, sur les jachères, les côtés des routes et les forêts communales, etc... L'application des méthodes de DRS + CES (les fossés) n'augmente pas la production de biomasse, mais réduit les surfaces productives. Par contre, la GCES attache beaucoup d'importance à l'amélioration de la production de biomasse et à la gestion judicieuse des matières organiques pour restituer rapidement au sol les nutriments indispensables à la production végétale.

Dans la forêt tropicale humide africaine, 8 à 15 t/ha de litière sont restituées au sol chaque année. Dans les savanes, ce sont 2 à 8 t/ha de feuilles qui retournent au sol à moins que le feu ou le bétail les détruisent ! Après défrichage (brûlis de la végétation naturelle et mise en culture), le taux de matières organiques des couches humifères diminue de 40 % en quatre à dix ans en fonction de la gestion des résidus organiques : fumier, compost, enfouissement direct ou paillage.

Sous culture, la biomasse disponible n'est pas négligeable :

- la culture de maïs et sorgho peut laisser 2 à 5 t/ha/6 mois de résidus utilisés actuellement pour nourrir le bétail ou pour pailler la plantation de café ;
- soja, arachides et haricots produisent 0,5 à 2 t/ha de fourrage de qualité ;
- manioc et patates douces fournissent 0,5 à 2 t/ha de biomasse utile pour nourrir les cochons ou pailler le café ;
- la bananeraie (à densité 3 x 5 m) peut produire 3,3 t/ha de stipes et 2 à 6 t/ha de feuilles utilisées comme paillage ou fourrage ;
- enfin, les jachères courtes (quelques mois entre les deux cycles culturels) et les adventices fournissent 0,5 à 2 t/ha/an de matière verte.

L'AGROFORESTERIE

Elle peut augmenter fortement la production de biomasse des champs cultivés. Deux cents arbres (*Grevillea robusta*, *Cedrella serrata*, *Polyscias fulva*, etc...) plantés autour ou dans les champs peuvent produire assez de bois de chauffage pour toute la famille et en plus, 1 à 4 t/ha/an de feuilles et brindilles très appréciées pour le paillage.

Plantées tous les 5 à 10 mètres, les haies vives de *Calliandra calothyrsus*, *Leucaena leucocephala* ou *diversifolia*, ou de *Cassia spectabilis*, peuvent produire 3 à 9 t/ha/an de feuilles (excellent fourrage) et 2 à 7 t/ha/an de branchettes pour le feu. Ainsi, la biomasse produite sur un champ cultivé par les résidus de culture, les arbres et les haies vives peut dépasser celle des forêts primitives ou secondarisées. Cependant, il faut songer à en restituer suffisamment au sol.

LES REMONTEES BIOLOGIQUES DE NUTRIMENTS PAR L'AGROFORESTERIE

Si le sol n'est pas trop acide ni trop pauvre en phosphore, les arbustes sélectionnés pour former des haies vives sont capables de fixer l'azote de l'air. Selon les auteurs et les sites (Balasubramanian et Sekayange dans les savanes de l'Est, König et Ndayizigiye, 1992 autour de Butare dans le plateau central), les trois coupes des haies peuvent ramener à la surface du sol : 75 à 130 kg/ha/an d'azote, 2 à 20 kg de phosphore, 20 à 60 kg de potasse et autant de calcium et de magnésium, en fonction de la richesse du sol en ces éléments. Cet apport minéral avoisine celui de dix tonnes de fumier de ferme. Sans compter l'apport en litière des 200 arbres/ha, il est clair que l'agroforesterie peut contribuer largement à l'équilibre organique et minéral du sol de deux façons : en réduisant sérieusement les pertes en nutriments par érosion et drainage, mais aussi en captant l'azote de l'air et les solutions entraînées par drainage au-delà des racines des cultures annuelles.

LES APPORTS DE MATIERES ORGANIQUES ET LES COMPLEMENTS MINERAUX

A la figure 73, sont comparés les effets de trois types de haies vives sur l'érosion (t/ha/an), le ruissellement moyen annuel (KRAM %), la production de biomasse des haies, distantes de sept mètres, et la production de céréales.

Biomasse : La haie de *Calliandra* a donné deux fois plus de biomasse que le *Leucaena* (4 à 8 t/ha/an). Les émondes étalées sur le sol (trois fois l'an) couvrent 80 % de la surface pour *Calliandra* et 40 % sous *Leucaena*. Mais, au bout de deux semaines, toutes les petites feuilles ont disparu, digérées par la microflore du sol ; il ne reste que les tiges que les enfants risquent de ramasser comme bois de feu. Il faudra peut-être chercher d'autres associations d'arbustes.

Ruissellement : Sauf durant le premier mois après plantation, le sol est bien couvert si bien qu'après deux ans, le ruissellement est très modéré : 12 % sur sol nu, 8 à 10 % sous culture traditionnelle, 1 à 2,5 % sous culture encadrée de haies vives chaque sept mètres. Le ruissellement n'est sérieux que lors des longues averses de la deuxième saison sous culture de sorgho sur un sol engorgé. Le ruissellement maximal journalier atteint 68 % sur jachère nue, 20 à 35 % sous les cultures.

Les pertes en terre : L'érosion en nappe et rigole décroît de 450 t/ha/an sur jachère nue à 80-120 t/ha/an sur cultures traditionnelles et 1 à 2 t/ha/an sous cultures, deux à trois ans après plantation de haies vives. Il faut noter que les cultures ont reçu 10 t/ha/an de fumier de ferme (et même 90 t/ha la troisième année). Même un tel apport de fumier n'a pas suffi à réduire l'érosion à un niveau tolérable : mais si l'érosion a tendance à augmenter d'année en année sous culture traditionnelle, elle diminue sur les parcelles protégées par des haies vives, à mesure que la pente du terrain cultivé diminue (de 27 à 15 %).

FIGURE 73

Influence de haies vives de *Leucaena leucocephala* et *Calliandra calothyrsus* (un mètre tous les sept mètres) sur le ruissellement annuel moyen (KRAM %), l'érosion (t/ha/an), la production de biomasse de la haie (kg/100 m/an) et les récoltes des deux saisons culturales à la station ISAR de Rubona (Rwanda) sur une pente de 27 % et un sol ferralitique acide (d'après Ndayizigiye, 1993)

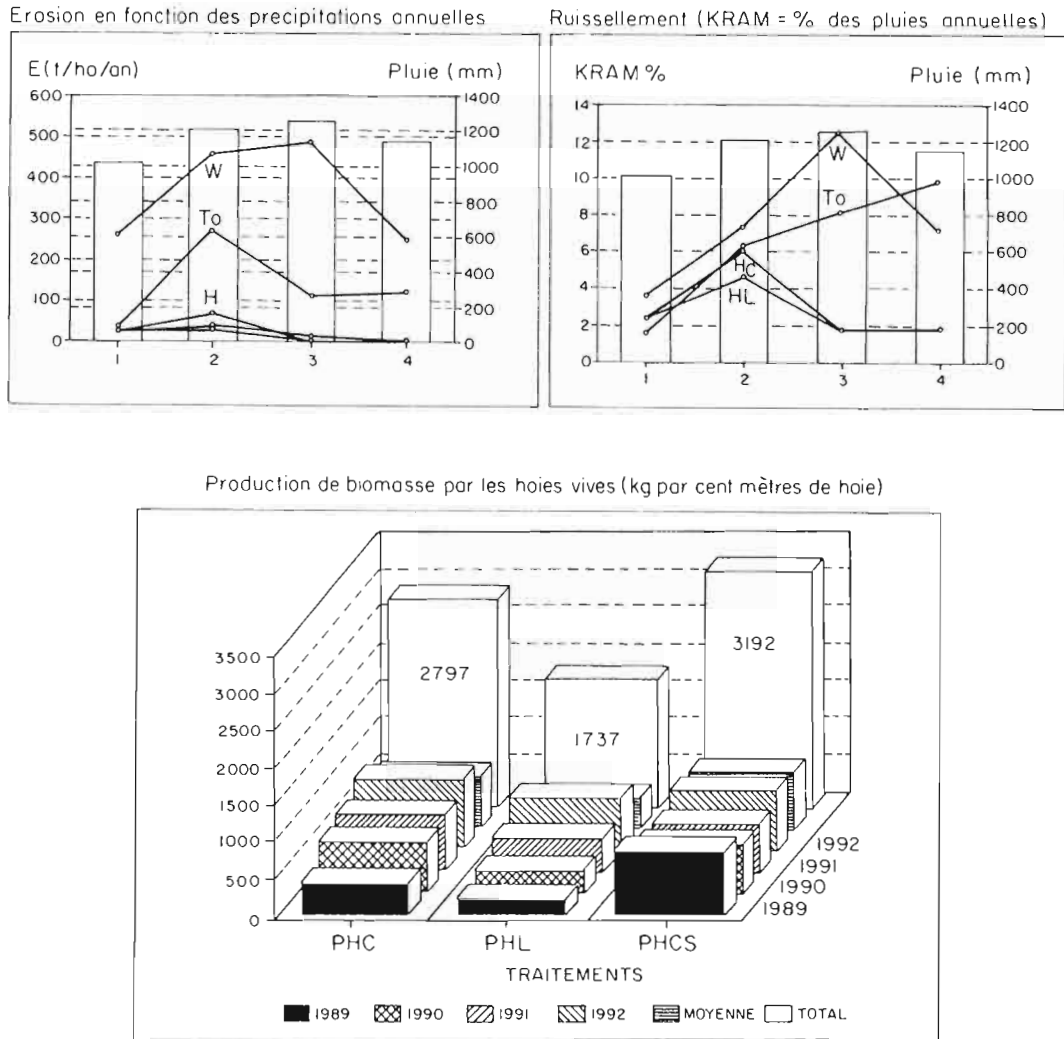
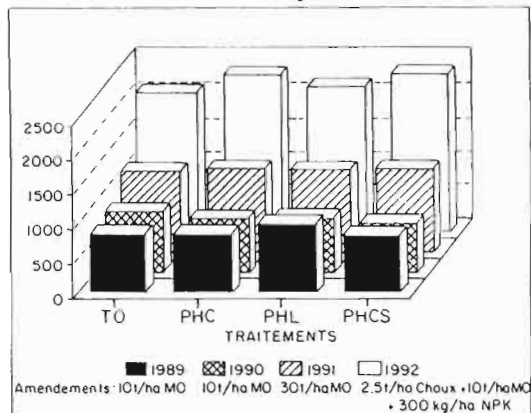
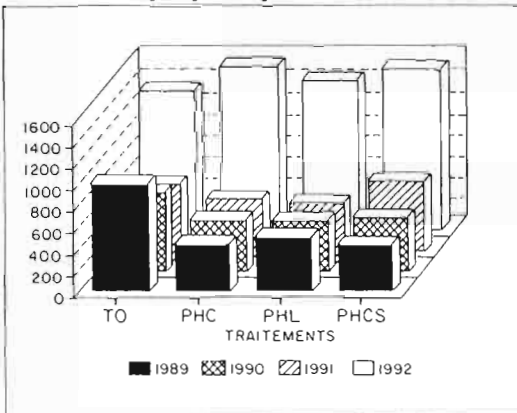


FIGURE 73 Cont.

Récolte de haricots + maïs (kg/ha) en 1ère saison



Récolte de sorgho grain (kg/ha) en 2ème saison



W = Parcelle nue standard de Wischmeier — To = Témoin régional

HC = Haie de Colliandro — HL = Haie de Leucaena — HCS = Haie de Colliandro + Setaria

TABLEAU 41

Exigence en NPK, chaux et fumier, propre à chaque culture sur les sols ferrallitiques acides du Rwanda (d'après Rutunga, 1991)

Cultures	N	P	K	Chaux, fumier, inoculum
Haricot	34	25-30	34	en fonction des maladies cryptogamiques + inoculum + chaux si pH < 5 + inoculum + chaux + fumier
Soja	20-40	40-50	30-50	
Pois	34	34	34	
Arachide	30	30	0	en altitude + fumier (+ chaux)
Sorgho	60	60	17	
Maïs	78	42	42	
Blé	88	42	42	
Riz irrigué	60	30	30	pour deux tonnes de paddy pour six tonnes de paddy
Pommes de terre	100	60	60	
Manioc	50	100	200	+ chaux + fumier si en altitude
Maraîchage	100	50	100	ou 35 tonnes de fumier
	30-50	30-70	100-200	

L'impact sur la production des cultures : La première année, les récoltes n'étaient pas significativement différentes : le champ est donc homogène au départ. La deuxième année, malgré 10 t/ha de fumier, la production a chuté de 10 à 30 %. La troisième année, suite à un apport de 30 t/ha de fumier, les rendements augmentent de 32 à 53-68 % dans les champs contenant des haies. Ce n'est que la quatrième année, lorsqu'on a ajouté 2,5 t/ha de CaCO_3 +, 10 tonnes de fumier et N_{51} , P_{51} , K_{51} , que les rendements ont crû sérieusement de 500 à plus de 2000 kg/ha de céréales et jusqu'à 2318 kg/ha entre les haies vives malgré la

place occupée par les haies (15 %). Quant à la production de sorgho en deuxième saison, elle est restée faible (420 à 640 kg/ha) sauf après chaulage et fertilisation minérale complémentaire (jusqu'à 1544 kg sur les parcelles avec haie).

Dans cet essai sur sol ferrallitique acide, il semble que même si l'érosion et le ruissellement sont maîtrisés, la productivité continue à décroître ! Dix tonnes de fumier plus six tonnes de paillis de légumineuses n'ont pas suffi à augmenter significativement les rendements des céréales et haricots, car les plantes, les sols, les animaux et les fumures organiques sont carencés dans les mêmes éléments (surtout P et N). Par contre, on a pu tripler les rendements et valoriser les travaux de lutte antiérosive après correction du pH (2,5 t/ha/3 ans de chaux ont suffi pour éteindre la toxicité aluminique) et apport minéral complémentaire (60 unités de NPK suffisent pour les céréales).

Jusqu'ici, il semble que les paysans s'intéressent progressivement aux haies vives, plus en tant que source de fourrage en saison sèche et délimitation de leur propriété, qu'en tant que pratique conservatoire des sols. L'ensemble de la gestion des haies vives n'a pas encore été complètement assimilé, en particulier la taille des racines et des branches pour limiter la concurrence.

LA RESTAURATION DE LA FERTILITE DES SOLS

En dehors des zones volcaniques, les sols ferrallitiques désaturés sont très acides et comportent souvent une toxicité aluminique et un excellent drainage qui entraîne un grand risque de lixiviation des engrais dans les eaux de drainage, surtout si le ruissellement est supprimé sans intensification de la culture. Dans ce cas, la conservation des sols n'est pas acceptable par les paysans car elle ne valorise pas leur travail : il est indispensable d'introduire simultanément, la conservation des sols, le stockage des eaux et la restauration de la fertilité pour améliorer significativement les rendements.

Si l'on veut restaurer en un ou deux ans la fertilité des sols, il faut respecter les six règles suivantes :

- contrôler le ruissellement et l'érosion ;
- soussolage profond pour réorganiser l'enracinement ;
- stabiliser la macroporosité par l'enfouissement de matière organique (ou de chaux) et par une culture à forte production racinaire ;
- corriger le pH (pH 5) ;
- revitaliser le sol par un apport de fumier ou compost (3 à 10 t/ha/2 ans) ;
- corriger les carences principales du sol ou tout au moins, nourrir les cultures.

LA FUMURE D'ENTRETIEN

Comme on l'a vu dans l'essai de Rubona (figure 73), une fois l'érosion maîtrisée et la fertilité physique, biologique et chimique du sol restaurée à un niveau acceptable, il reste encore à nourrir les plantes cultivées (fumure localisée) à leur rythme (doses fractionnées) en fonction des objectifs de production (N = 40 à 160 kg/ha/an + P = 30 à 100 kg + K = 20 à 100 kg/ha/an) des plantes cultivées et des risques de lixiviation périodiques. En pratique,

il faut gérer au mieux les résidus organiques et ajouter les compléments minéraux indispensables pour les cultures puisque les sols ferrallitiques ont une très faible capacité de stockage des nutriments et de l'eau.

Rutunga (1991) a constaté que sur les terres pauvres du Rwanda, le chaulage (2 à 5 t/ha) doit être renouvelé tous les trois ans et la fumure organique tous les trois cycles culturaux. Sur les terres moyennement riches, le chaulage n'est guère utile, mais bien la fumure minérale et organique. Quant aux riches terres volcaniques, les faibles doses de NPK n'ont entraîné jusqu'ici que de faibles améliorations de rendement.

CONCLUSIONS SUR L'APPROCHE GCES AU RWANDA [planche photographique 32]

Dans les montagnes tropicales fortement peuplées d'Afrique Centrale, les risques d'érosion (300 à 700 t/ha/an) et la dégradation de la fertilité des terres augmentent avec la pente et la densité de la population (150 à 800 habitants/km²) (figure 74).

Il existe des systèmes de production capables de maintenir l'érosion à un niveau tolérable : le paillage sous caféiers, bananiers ou manioc, les gros billons en courbe de niveau, couverts en permanence, les engrais verts couvrant la surface du sol, la reforestation produisant une bonne litière. Le terrassement radical (1000 jours de travail) ou progressif (100 jours) et les autres structures antiérosives, sont moins efficaces que les systèmes biologiques (talus enherbés, haies vives) et exigent plus de travail d'entretien et d'espace.

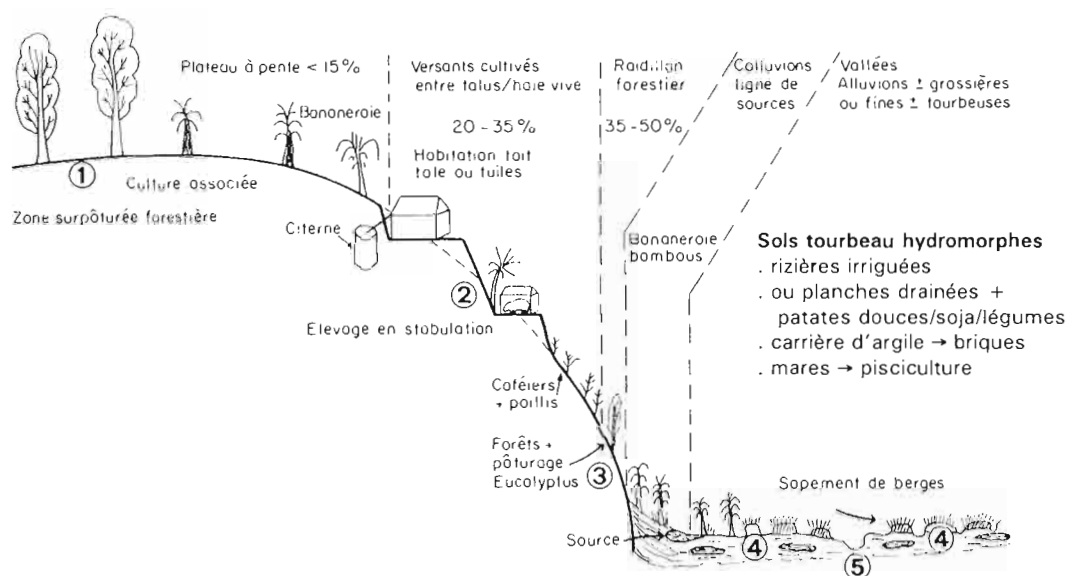
L'agroforesterie (par exemple 200 arbres/ha plus des haies vives tous les cinq à dix mètres) permet de contrôler l'érosion (1-3 t/ha/an), de produire fourrage et paillage (4 à 10 t/ha/an) et de récupérer des nutriments en profondeur (N 20 à 100 ; P 10 à 20 ; K 2 à 40, Ca + Mg 20 à 40, etc...) pour des temps de travaux raisonnables (10 à 30 jours par an). Cette biomasse peut être valorisée par l'élevage car le fumier est l'une des clés pour fertiliser les sols ferrallitiques, véritables passoires.

Cependant, malgré l'apport de 10 t/ha/an de poudrette et de 4 à 8 t/ha de paillis de légumineuse, la production des terres est restée très basse (400 à 800 kg de haricot, maïs et sorgho, 3 à 8 t/ha de manioc). Pour relever le défi de doubler la production avant que la population ne double (17 ans), il est indispensable de proposer un paquet technologique comprenant à la fois la gestion de l'eau et de la fertilité des sols : citernes, haies vives, fertilisation organique (paillage, engrais verts et fumier de ferme amélioré) avec un complément minéral (NPK 40 à 100 kg/ha/an et chaulage 2-5 t/ha/3 ans). La CES ne suffit pas.

On peut observer que les plus fortes populations du monde vivent dans des "jardins multiétagés" où les interactions positives entre l'élevage, les cultures et les arbres sont poussées à l'extrême. En Afrique, il reste encore beaucoup à faire pour atteindre l'intensité de la production des jardins asiatiques.

FIGURE 74

Les risques d'érosion et les propositions d'améliorations des collines granito-gneissiques du Rwanda



Sols ferrallitiques acides

- . perméables
- . forte lixiviation
- . carence P-N-KCaMg
- . bonne résistance à l'érosion

- (1) Battance et rigoles → décapage de l'horizon humifère
- (2) Battance, rigoles → ravines
tassement des pistes
- (3) Sapement des berges par la rivière, ravines et glissements en masse
- (4) Dépôts de texture très irrégulière : graviers- sables ; argiles-tourbes nécessité de drainage
- (5) Rivière torrentielle à débit et charge solide très variable

Problématique

- Comment alimenter une population très dense sur des sols très pauvres
- Comment évacuer les excès d'eau sur des pentes cultivées très fortes
- Comment améliorer la gestion des bas-fonds

Tentatives d'améliorations

- 1 Bas-fond à drainer et cultiver sur planches : très difficile tant que tout le bassin n'est pas aménagé
- 2 Versants : fixation des terres par haies vives tous les dix mètres et 200 arbres/ha.
→ production de fourrage, de bois de feu, de paillage
→ stabiliser les terres contre les glissements (racines), le ruissellement/paillis
→ les arbres ramènent en surface des matières organiques + nutriments
→ talus enherbés et haies vives
- 3 Nécessité absolue sur ces sols pauvres et acides : gestion biomasse + apports minéraux
→ fosse fumière/compostière + chaux et P_2O_5 + cendres pour élever le pH > 5
→ apport d'un complément minéral localisé fractionné aux plantes
- 4 Transformer les talus en zones fourragères stabilisées par les haies vives de légumineuses + herbes et rejets de labour (racines, brindilles, pierres)
- 5 Aménagement des pistes : enherbement généralisé et drainage organisé vers des citernes ou des fosses de sédimentation plantées en bananiers
- 6 Nécessité d'organiser le marché des produits agricoles (pistes, etc) et des intrants

Chapitre 12

Une nouvelle approche de lutte antiérosive en Haïti

EXEMPLE D'UN TRANSECT CALCAIRE-BASALTE DANS LES COLLINES DU SUD D'HAÏTI

PROBLEMATIQUE

UN CONTEXTE PARTICULIER

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

La malnutrition dans les campagnes, la baisse des exportations (50% ces 10 dernières années), l'exode rural important et l'incapacité des familles à épargner, plongent le paysan haïtien dans un cycle de décapitalisation dont il aura du mal à se sortir, les revenus agricoles très faibles (ils sont passés de \$ 450 à \$250 en 1992) ne permettant même plus à la majorité d'entre eux de renouveler leur capital animal et leur capital outil. De plus la démographie élevée accentue la pression foncière. Ainsi la mise en culture de plus en plus rapprochée diminue les temps de jachère, provoque le surpâturage et favorise la dégradation des sols.

Celle-ci ne s'exprime pas seulement par une baisse de la fertilité mais aussi par une accélération des pertes en sol, les facteurs du milieu physique étant naturellement fragiles: 60% des terres cultivées sont situées en montagne sur des pentes très fortes (de 20 à 80%) et le régime des pluies souvent violentes favorise le ruissellement. Le corollaire de tous ces facteurs est une baisse de la productivité du travail devant laquelle la production de charbon de bois apparait comme une alternative à l'amélioration des revenus agricoles. Cette production provoque un déboisement anarchique qui accélère la détérioration des ressources naturelles, véritable support des exploitations agricoles.

Cette décapitalisation ainsi provoquée s'accompagne d'une perte de la cohésion sociale et oblige le paysan haïtien à adopter une attitude de survie, ce qui rend plus difficile la

Bernard Smolikowski, Directeur du PRATIC (1988-1992),

Mission de coopération à Praia, République du Cap Vert

Eric Roose, Directeur de Recherche en Pédologie, ORSTOM, Montpellier, France

Michel Brochet, Directeur des études, ENSAT/CNEARC, Montpellier, France

gestion collective de l'espace (contrôle des parcours du bétail, de la coupe des ligneux) nécessaire à la réussite des actions d'aménagement et de lutte antiérosive (LAE).

L'ÉCHEC DES STRATEGIES DE LAE DITES "MODERNES"

Depuis les années 1960 jusqu'en 1990 les instances étatiques, conseillées par les organismes internationaux et les bailleurs de fonds, ont cru voir dans la résolution des problèmes liés à la conservation des ressources naturelles la solution à la crise du secteur rural. Le contexte particulier d'Haïti a favorisé la mise en oeuvre de nombreuses actions et projets s'appuyant sur une stratégie "moderne" d'équipement rural et a, ainsi, largement contribué à faire de ce pays un "laboratoire de la lutte antiérosive".

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

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

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

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

En effet ceux-ci se caractérisent par un système d'héritage qui favorise le morcellement des propriétés et l'indivision, augmente l'insécurité foncière et le risque vivrier par la diminution des surfaces en culture.

Or, la mise en place des ouvrages nécessite de sacrifier une certaine portion de la surface cultivable, déjà restreinte, sans possibilité d'amélioration des rendements avant de nombreuses années. Ils exigent un surcroît de travail pour leur entretien, travail qui ne peut être assuré que par le paysan lui-même. De plus ces techniques ne réduisent pas la dégradation des terres entre les ouvrages et n'améliorent pas leur productivité. Elles sont peu efficaces et augmentent parfois les risques (débordement, ravinement, glissement) en

déséquilibrant le versant. Aussi, pour éviter ces types de problème, ces aménagements sont souvent réalisés sur des terres marginalisées par les agriculteurs.

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

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

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

UNE NOUVELLE APPROCHE PARTICIPATIVE: LES PROJETS SALAGNAC/AQUIN ET PRATIC¹

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

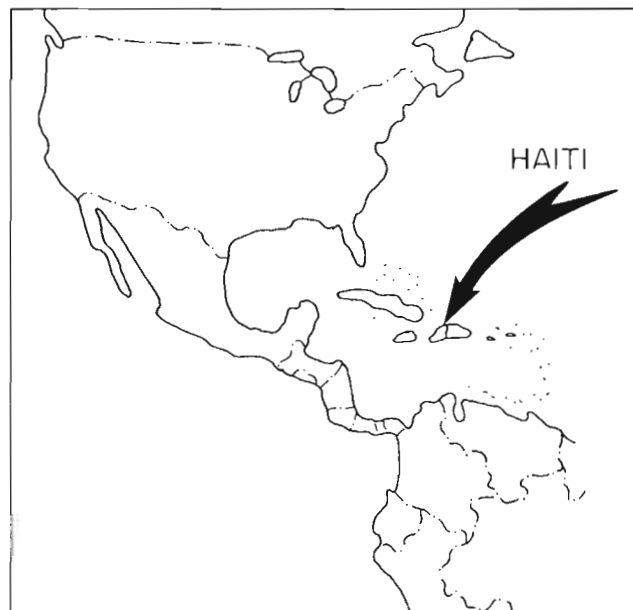
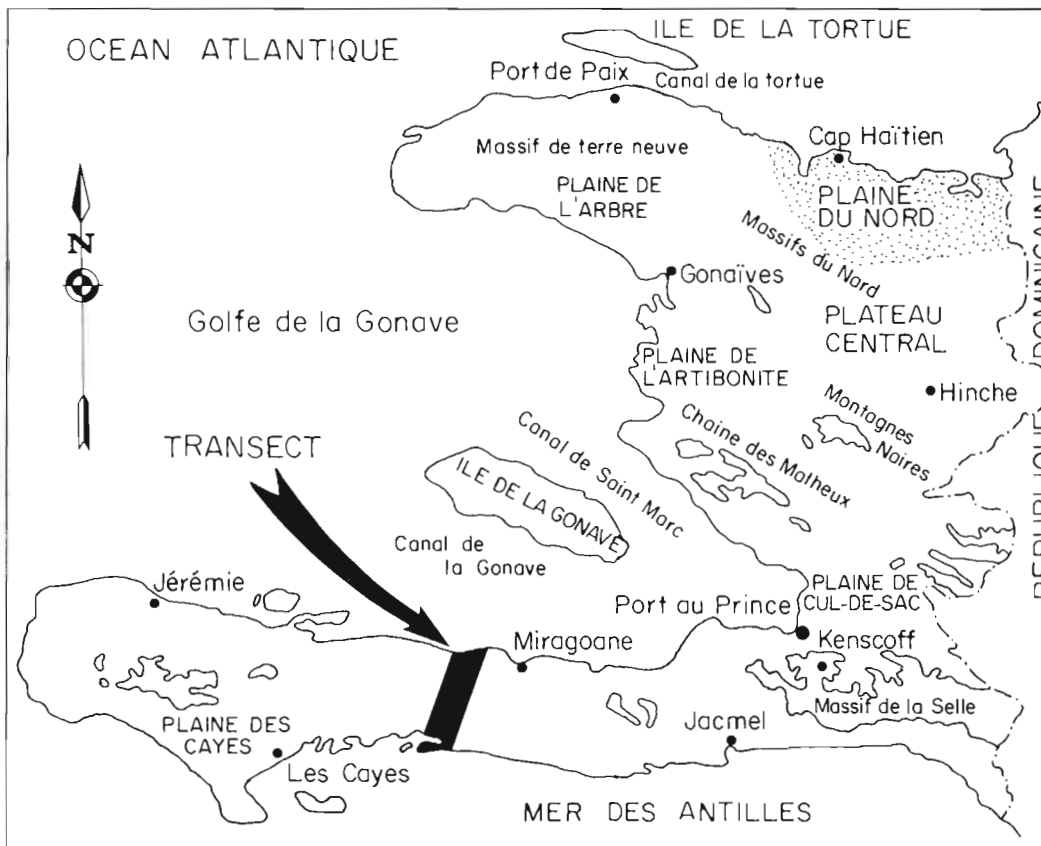
Cette approche, encore appelée la gestion conservatoire des eaux, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), se propose d'améliorer l'infiltration au champ afin d'augmenter la production de biomasse (donc les rendements) en couvrant mieux le sol et de rétablir l'équilibre des bilans des matières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

Elle a été adoptée par deux projets de la coopération française, Salagnac-Aquin (1978-92) et PRATIC (1988-92), dont les interventions² sur le transect Petite rivière de Nippes-Salagnac-Aquin (figure 75), visent à favoriser l'intensification et la diversification des productions agricoles tout en stabilisant les versants: nouvelles cultures de rente, augmentation des rendements des cultures vivrières sur les espaces présentant de bonnes potentialités afin de libérer les zones les plus fragiles de la pression culturale (travail du sol fréquent et surpâturage) et de les reconverter en zone d'arboriculture fruitière et forestière, amélioration des conditions de l'élevage, etc...

¹ Projet de Recherche appliquée à l'Aménagement intégré des Terroirs Insulaires Caraïbes.

² Ces interventions ont été brutalement interrompues suite à la suspension de la coopération, décision survenue après le coup d'état de septembre 1992.

FIGURE 75
Carte d'Haïti



Elle s'est appuyée sur les principes suivants:

- **Permettre dès la conception du projet une participation paysanne.** C'est un élément déterminant de l'orientation des actions de protection et une condition sine qua non pour assurer le succès du projet, les paysans étant les seuls capables d'assurer l'entretien des aménagements à l'échelle de la parcelle et/ou du versant.
- **Renforcer les méthodes traditionnelles de conservation de l'eau et des sols.** Les paysans haïtiens ont d'ailleurs eux-mêmes adopté des stratégies traditionnelles de lutte antiérosive et d'amélioration de la fertilité des sols leur permettant de survivre.
- **Choisir en priorité des zones qui ont conservé un maximum de potentialités** en matière de production agricole.
- **Intervenir au niveau de la parcelle et du versant**, puis, à chaque fois que cela s'avère possible, à l'échelle du bassin versant. L'aménagement est donc pensé à l'échelle de la parcelle, puis de l'exploitation et enfin du terroir. La conception d'une opération d'aménagement "à la parcelle" n'est pas une alternative à une opération d'aménagement au niveau d'un bassin versant. Ces niveaux ne relèvent pas de la même stratégie d'intervention (logique de développement rural et logique d'équipement). Elles doivent au contraire être complémentaires.
- **Accompagner les actions de conservation des sols par des actions convergentes** permettant l'amélioration des systèmes de production (intensification et diversification des systèmes de cultures, amélioration des systèmes d'élevage, création d'opérations d'épargne et de crédit).
- **Mettre en place un mode de relations contractuelles** permettant de définir avec précision les conditions de l'intervention et les relations projet-paysans. Il faut en effet bien définir les actions qui relèvent de la responsabilité stricte de chaque paysan (aménagement à la parcelle), celles à la charge des communautés rurales (routes, pistes rurales, citernes communautaires, correction de ravines), et enfin les engagements du projet.
- **Permettre une action de programmation, de suivi et d'évaluation** (mesure des effets).

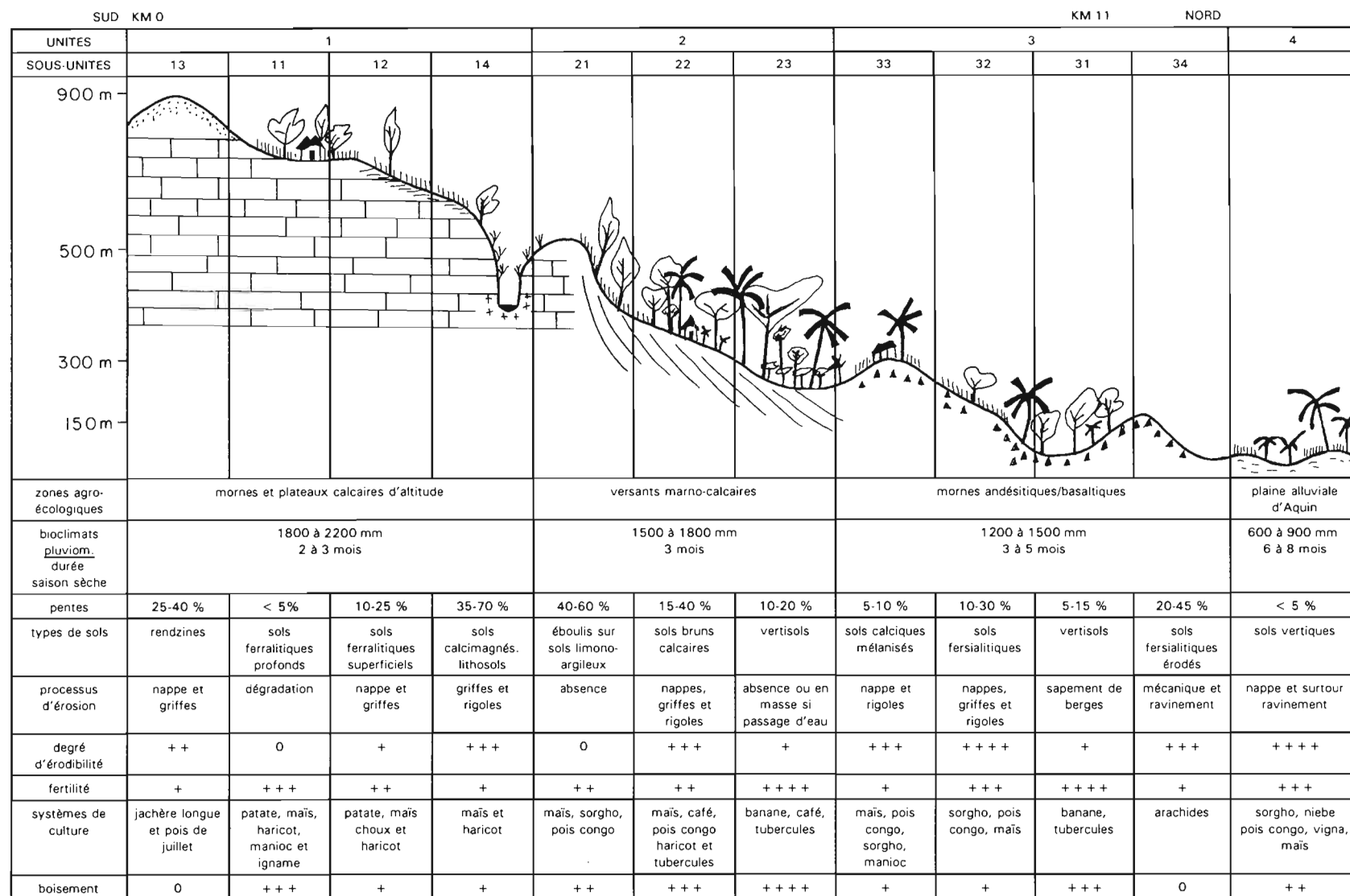
Ce type d'opération nécessite beaucoup de temps (8 à 10 ans) pour modifier sensiblement les systèmes de production et infléchir les pratiques tout en responsabilisant les paysans face à la gestion de leur environnement.

Trois phases sont nécessaires:

- **1ère phase: réalisation d'un diagnostic du milieu** de façon à connaître les potentialités et contraintes du milieu physique, les processus de dégradation des sols (où, quand et comment se manifestent-ils) mais aussi les stratégies paysannes en matière de fonctionnement des exploitations et des techniques de gestion de l'eau et de la fertilité. Ce diagnostic permet le dialogue avec les communautés et la mise en confiance.

FIGURE 76

Coupe agro-écologique schématique du transect (d'après Guarrigue et Smolikowski, 1990)



- **2ème phase: expérimentations en milieu réel** pour établir un référentiel technique (comparaison des techniques traditionnelles avec les techniques proposées).
- **3ème phase: évaluation des résultats par les communautés et les techniciens**, puis planification des aménagements à l'échelle du versant et du bassin versant.

DIAGNOSTIC DU MILIEU

DIVERSITE DES MILIEUX NATURELS

Cette diversité résulte de l'interaction de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature des matériaux, les bioclimats, la topographie.

Quatre grandes unités agro-écologiques (figure 76) ont pu être déterminées ainsi que leurs sous-unités. Elles sont fondamentales dans l'explication et la compréhension des choix que font les agriculteurs au niveau de la répartition spatiale des cultures et de l'utilisation des sols sur chaque parcelle. Il s'agit:

Unité 1: Mornes et plateaux calcaires d'altitude. Ils s'étendent de 500 à 900 m et sont représentés par des sols ferrallitiques vers le haut et des sols calcimagnésiques vers le bas. La pierrosité est importante et la fertilité organique faible. Les précipitations sont fréquentes et parfois intenses (60 à 80 mm/h). Les vents peuvent être violents et présenter des contraintes supplémentaires aux cultures dont l'association de base est constituée par le maïs-haricot-patate douce parfois renforcée par le chou pommé et l'igname. C'est la zone la plus déboisée du transect à l'exception des zones densément peuplées grâce à la présence du jardin, toujours en propriété, entourant la maison d'habitation: le jardin devant "porte kaye" encore appelé "lakou".

Unité 2: Versants et bas-fonds marno-calcaires. C'est une zone d'émergence de sources. Elle est caractérisée par des sols plus favorables aux cultures pérennes (vertisols, sols bruns calcaires). Les précipitations y sont assez importantes pour permettre deux saisons de culture avec l'igname, le maïs, le sorgho et le haricot noir principalement. Les bananes, le café et le malanga (*Xanthosoma* spp) se rencontrent aussi dans les endroits plus frais (ravines, bas-fonds). Le boisement est très important avec une dominance de "l'arbre véritable" plus vulgairement appelé l'arbre à pain (*Artocarpus incisa* var. non *semifera*).

Unité 3: les mornes andésitiques ou basaltiques. Cette unité agro-écologique est moins bien arrosée (1200 mm/an) et ne dépasse pas 300 m d'altitude. La saison sèche assez marquée ne permet qu'une saison de cultures : sorgho, arachide, pois congo et parfois maïs. Les sols d'origine volcanique présentent de bonnes aptitudes agronomiques, mais souvent pentus, ils sont soumis à une forte érosion de surface par ruissellement diffus ou en griffes et rigoles.

Unité 4 : la plaine d'Aquin. Elle est située entre le niveau de la mer et 300 m d'altitude. Elle se caractérise par un climat tropical sec où la pluviométrie annuelle est comprise entre 600 et 1000 mm avec de grandes variations interannuelles et une saison sèche de 6 à 8 mois. Les sols sont vertiques et peu filtrants sur pentes faibles (3 à 10%). Les systèmes de cultures

sont centrés sur diverses associations : maïs, niébé, sorgho, pois congo, vigna. Le ravinement fréquent est provoqué par des espaces de concentration de l'eau de pluie (routes, chemins).

DIVERSITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Plusieurs facteurs expliquent cette diversité :

- Une pression sur le foncier inégale selon les zones ;
- Des modes de tenure complexes dont les quatre plus importants sont, classés par ordre de sécurité décroissante, la propriété, la terre héritée formellement divisée, la terre héritée informellement divisée, la terre héritée indivise, auxquels il faut rajouter les modes de faire-valoir : faire-valoir direct (le plus courant), le fermage (60 à 120 \$/ha:an), et le métayage (part versé au propriétaire de 1/3 à 1/2) système adopté par les plus démunis ;
- La main-d'oeuvre disponible, vendue ou achetée ;
- La disponibilité en capital-bétail.

Ces facteurs endogènes déterminent trois grandes classes de systèmes d'exploitation qui se caractérisent par des niveaux socio-économiques hétérogènes :

- **Faible** : paysans ayant très peu de terre en propriété (moins de 1 hectare) mais plutôt en métayage, de très faibles ressources de trésorerie, et une épargne sur pied (animaux) réduite. Ils sont obligés le plus souvent de vendre leur force de travail pour améliorer leur revenu. Pour certains c'est une phase de démarrage de l'exploitation, pour d'autres c'est un état permanent dont la cause principale est la rente foncière qui empêche tout processus d'accumulation.
- **Moyen** : la SAU (entre 1 à 3 ha.) suffit pour alimenter toute la famille. Le chef d'exploitation est donc moins dépendant des paysans aisés et du marché, mais aussi moins intégré à celui-ci. L'accumulation est basée sur la production agricole. Elle peut être ralentie par l'agrandissement de la famille. L'exploitation oscille entre les deux niveaux extrêmes avec un équilibre dynamique.
- **Elevé** : la SAU (plus de 3 ha.) permet une production supérieure aux besoins de la famille. Le cheptel a atteint une taille suffisante pour servir d'épargne productive. En général les processus d'accumulation ont pour origine un héritage important et/ou une double activité (menuiserie, maçonnerie,...). Ces exploitations drainent une main d'oeuvre importante et augmentent leur capital rapidement.

Cette hétérogénéité dans les systèmes d'exploitations agricoles permet d'expliquer les différents modes de gestion des ressources naturelles et leur niveau de dégradation : ainsi les stratégies du maintien de la fertilité seront différentes; de même des charges à l'hectare du bétail, sur des exploitations présentant peu de surface, favoriseront le tassement puis le ruissellement et enfin l'érosion; la vente de la force de travail ou le travail sur des terres à faible sécurité foncière ne favorise pas l'investissement maximum en travail et donc n'incite

pas à la protection de l'espace cultivé. Il est d'ailleurs à noter que les terres en indivision présentent des stades de dégradation avancés : tassements très importants, roche-mère affleurante, absence d'arbres, fertilité très faible.

DIVERSITE DES PROCESSUS DE DEGRADATION

La grande diversité dans les facteurs précédemment cités (milieu agro-écologique et systèmes d'exploitation) expliquent également la diversité des processus de dégradation de la couverture pédologique qui s'effectue en trois temps :

- Minéralisation continue et rapide des matières organiques non compensée après le défrichement (peu ou pas d'enfouissement de M.O.) et accélérée par l'érosion diffuse (sélective).
- Glissement progressif des couches superficielles par un travail répété du sol sous les cultures vivrières occupant très temporairement le sol (sur pente le travail du sol est toujours réalisé du haut vers le bas).
- Développement du ruissellement et du ravinement suite au tassement du sol par le bétail au piquet et sur les chemins, et surtout suite à la diminution de la capacité de stockage d'eau dans les sols décapés par l'érosion mécanique sèche (anthropique). Dans les zones de substrats calcaires la pluie d'imbibition est de 70 à 80 mm sur les sols profonds ferrallitiques et de moins de 30 mm sur les terres finies ou les rendzines. Or des pluies supérieures à 60-80 mm/h tombent chaque année (3 à 6) ainsi que des cyclones (un tous les 4 à 10 ans) avec des pluies de 400 mm en 5 jours.

L'érosion en nappe ne semble pas très importante dans l'unité 1 : on observe rarement de véritables croûtes de battance mais souvent le rejet d'agrégats, la fonte des buttes et le tassement de la surface du sol. Les sols argileux, bien structurés, calciques et caillouteux sont très résistants : le splash dégage des agrégats.

L'érosion linéaire est partout présente sous forme de griffes (unité 1) (canaux de quelques centimètres), rigoles (décimètres) évoluant rapidement en ravines actives (mètres) (unité 2, 3 et 4) si on n'intervient pas. En effet les terres où la roche-mère affleure ("terre finie"), les chemins et les pistes, les jachères surpâturées et les sols vertiques sur basaltes sont à l'origine du ruissellement dangereux sur les fortes pentes. Les sols bruns sur basalte, imperméables, ruissellent énormément ($P_i = 2$ à 5 mm en humide).

L'érosion en masse s'effectue lentement par creeping et érosion mécanique sèche (travail du sol) sur fortes pentes et par érosion régressive sur pentes convexes à partir du réseau de ravines (unité 3 surtout).

L'érosion des berges est très active dans les plaines où les rivières surchargées de sédiments (unité 4) changent fréquemment de lit.

D'une façon générale, l'érosion est plus importante sur les sols basaltiques ou andésitiques que sur les sols calcaires, mais les conséquences économiques varient suivant la nature du sous-sol. En effet, sur le substrat basaltique ou andésitique, la vitesse d'altération

de la roche-mère est élevée et la pédogénèse assez rapide : les possibilités de restaurer la fertilité du milieu après dégradation sont relativement bonnes; tandis que sur le substrat calcaire la vitesse de la pédogénèse est beaucoup plus faible: la restauration de la fertilité, une fois le capital sol entamé ou détruit, est réduite.

LES STRATEGIES TRADITIONNELLES PAYSANNES ET LEURS LIMITES

Dans ces milieux aussi diversifiés on constate que la paysannerie sélectionne, associe et répartit les espèces végétales dans le temps et l'espace. Ainsi, les systèmes de cultures s'expriment au travers de choix raisonnés et renseignent sur le degré d'adaptation des paysans. Cette adaptation ne signifie pas pour autant qu'il y a équilibre et certaines voies d'évolutions sont inquiétantes et risquent d'aboutir à terme à des ruptures.

LUTTE CONTRE LA DEGRADATION : UNE GESTION PAYSANNE DE LA FERTILITE

Les "trois jardins" haïtiens : amélioration de la fertilité ou accentuation de la dégradation des sols par le transfert des résidus de culture?

Ces trois jardins se caractérisent par des transferts de fertilité de l'un à l'autre par l'intermédiaire du bétail.

Dans l'unité 1, chaque exploitation est constituée au moins de ces trois jardins :

- **Le jardin "devant porte kaye" (A)** encore appelé "lakou" (de 500 à 1000 m²) : c'est une zone de végétation dense entourant la maison et toujours en propriété. Dans ce jardin de nombreuses espèces pérennes ou annuelles sont associées et forment plusieurs étages de végétation: avocatiers (*Persea americana*), chadéquiers (*Citrus maxima*), bananiers, caféiers, "malanga" (*Xanthosoma campestris*), "mazonbelle" (*Colocacia esculenta*), igname (*Discorea* sp), cristophine ou "mirliton" (*Sechia edulis*), giraumon (*Cucurbita moschata*), cive (*Allium fistulosum*).
- **Le jardin "pré-kaye" (B)** (de 1000 m à 5000 m²): cette zone, non boisée, est délimitée par une haie vive d'arbustes afin de marquer la propriété, abriter les cultures du vent et les protéger des animaux. On y cultive en association le haricot, le maïs, l'igname, la patate douce (*Ipomea batata*) et le manioc (*Manihot utilissima*).
- **Les jardins "loin kaye" (C)** dont la surface totale est souvent supérieure à 5000 m²: ils sont situés dans des zones très peu boisées et éloignées de l'habitat. Ils sont en ferme, en métayage ou en indivision. Ils sont peu fertiles et dégradés. Les paysans y pratiquent une association de haricots et de patates douces pendant six mois ensuite la parcelle est laissée en jachère pâturée. Si les jardins sont vraiment dégradés et situés sur de fortes pentes (D) ils sont laissés en jachères longues (plus de trois années) pour le pâturage des caprins (zone de racks).

Les exploitations des unités 2 présentent quelques différences par rapport à l'unité 1. En effet, le boisement important dans cette zone permet difficilement de différencier les jardins de type A et B que l'on peut assimiler à un seul jardin A. Par contre, il apparaît un nouveau

type de jardin appelé "champ" par les paysans et composé essentiellement de bananiers (associés parfois à du malanga) sous couvert arboré. Ces jardins ne se retrouvent pas toujours près des habitations, mais leur localisation dépend de la disponibilité en eau et de la fraîcheur du sol, c'est à dire dans les bas-fonds ou près des lignes de sources.

Dans l'unité 3 existe toujours le jardin près de la maison, espace protégé et délimité par une haie continue, situé sur les mornes secs. Par contre, plus on descend en altitude et plus ce type tend à s'appauvrir: il ne subsiste que quelques arbres (cocotiers, manguiers) répartis autour de la maison. En fait les jardins de types A et B ne s'assimilent plus qu'à un seul jardin B légèrement boisé. Par contre, on retrouve toujours les jardins pérennes des bas-fonds, densément boisés et à haute fertilité, qui peuvent être assimilés à un jardin de type A, transféré ici dans les espaces plus humides.

Dans l'unité 4, cette structure de jardin disparaît.

On peut déduire de cette analyse que la répartition des différents jardins est principalement déterminée dans l'unité 1 par l'éloignement des parcelles de l'habitation et dans les unités 2 et 3, par le type de sol (bas-fonds = colluvions et alluvions) et l'humidité.

Par contre, il est important de noter que pour gérer les réserves de matières organiques les paysans réalisent des transferts de résidus de cultures d'une parcelle à l'autre (figure 77). Mais si la fertilité de certains jardins (le plus souvent en propriété) qui se trouvent près des habitations augmente, cela se fait au détriment des autres, plus éloignés (le plus souvent en métayage ou en fermage) qui voient leur fertilité baisser à cause des exportations régulières de résidus de cultures vers les autres parcelles à plus grande sécurité foncière. Les paysans ont peu intérêt à les fertiliser ne sachant pas s'ils pourront les exploiter l'année suivante. Le facteur "tenure foncière" joue un rôle très important dans la dégradation des sols.

LA PRATIQUE DES JACHERES

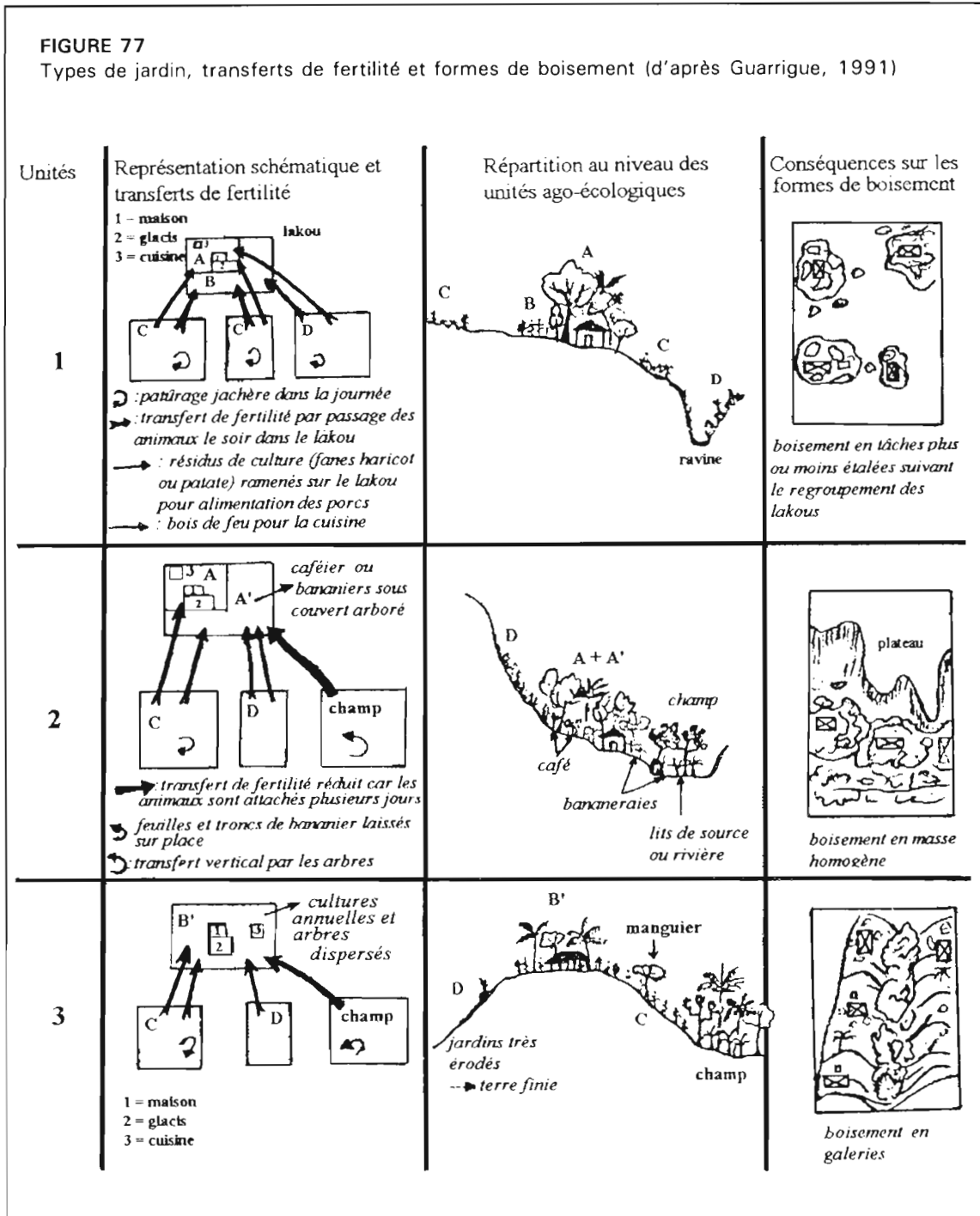
La jachère était autrefois une pratique courante en Haïti. Actuellement cette pratique tend à disparaître. Sa durée peut varier de trois mois à deux ans selon les types de jardin et la disponibilité en terre du paysan.

Dans l'unité 1 les moins bonnes terres, qui sont aussi les plus éloignées de l'habitation, sont laissées en jachère un an ou deux après un cycle de culture de un à deux ans. Pour les terres plus fertiles (plus près de l'habitat) la jachère ne dure que deux à six mois, le temps nécessaire pour fertiliser la parcelle en y laissant les animaux auxquels on apporte le fourrage. Dans le premier cas on a une mise "au repos" de la terre, dans le second c'est une réelle technique de fertilisation.

Dans l'unité 3, les associations (maïs, sorgho, pois congo) occupent la parcelle presque toute l'année d'avril à février, puis dès les premières pluies (mars-avril) commence la préparation des terres. Les jachères sont donc très rares et n'interviennent que de façon très espacée. Le niveau de fertilité des sols ne dépend que du fonctionnement des associations de cultures car il n'existe pas non plus de fertilisation minérale. Lorsqu'une parcelle n'est pas mise en culture, ce sont des raisons économiques qui sont évoquées (manque de semence, peu de disponibilité en main d'oeuvre) mais jamais des raisons liées au maintien de la fertilité.

FIGURE 77

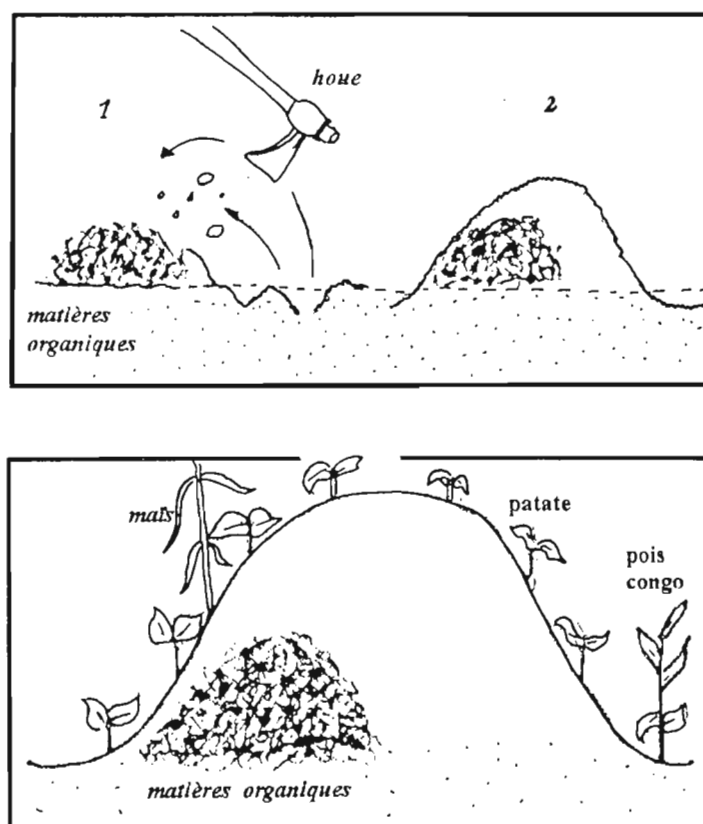
Types de jardin, transferts de fertilité et formes de boisement (d'après Guarrigue, 1991)



Conclusions: lorsque les jachères sont longues (un à deux ans) les animaux sont laissés au piquet sans apport de fourrage, d'abord pour y manger les résidus de récolte directement sur place (paille de maïs, de sorgho, fanes de patates), puis pour le pâturage. Il y a ainsi un recyclage directement sur place de la matière organique en déjections animales qui, non fermentées et exposées au soleil, subissent de fortes pertes en azote. Cette technique provoque souvent un tassement du sol sur forte pente, ce qui favorise le ruissellement.

FIGURE 78

Confection d'une butte avec concentration de la matière organique (d'après GRET/FAMV, 1991)



CONCENTRATION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES BUTTES

Cette pratique concerne tous les types de jardins (figure 78): après une jachère, et un mois avant les semis et plantations, les mauvaises herbes sont sarclées, puis séchées et rassemblées en tas. Elles sont ensuite recouvertes de terre prise dans l'horizon superficiel (15 cm), le plus riche en matière organique, pour former des buttes d'un mètre de diamètre. Cette opération va favoriser le développement racinaire par amélioration du drainage et aération. Mais surtout elle permet une concentration de la matière organique dans la butte et à l'intérieur de celle-ci. Ainsi le maïs, plante la plus exigeante, est semé dans la situation la plus favorable tandis que le pois congo, moins exigeant grâce à son système racinaire profond et puissant, dans la situation la moins favorable.

LE BRULIS

Cette pratique est surtout courante dans les unités 3 et 4 où la matière végétale résiduelle est très ligneuse: chaumes de sorgho, tiges de pois congo, tiges de manioc. Elle est donc brûlée

FIGURE 79

Réalisation de billons trop longs (d'après Smolikowski)

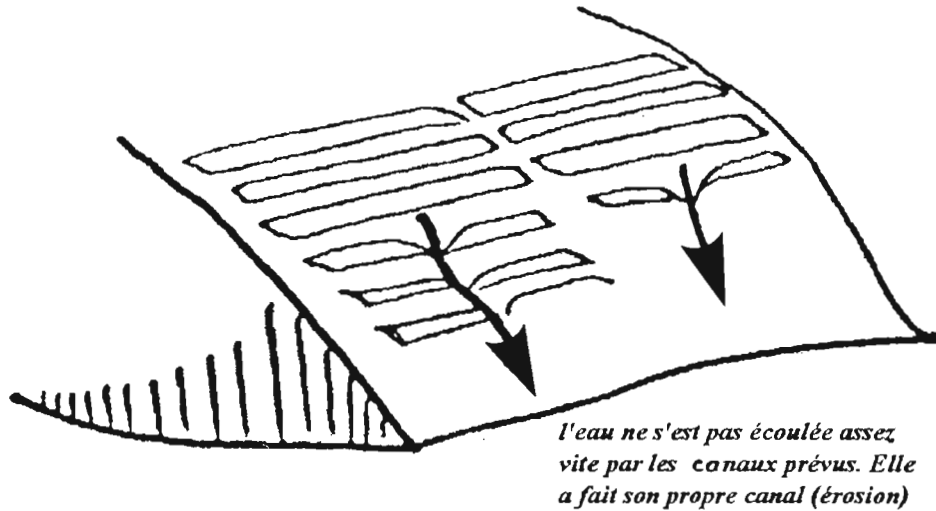
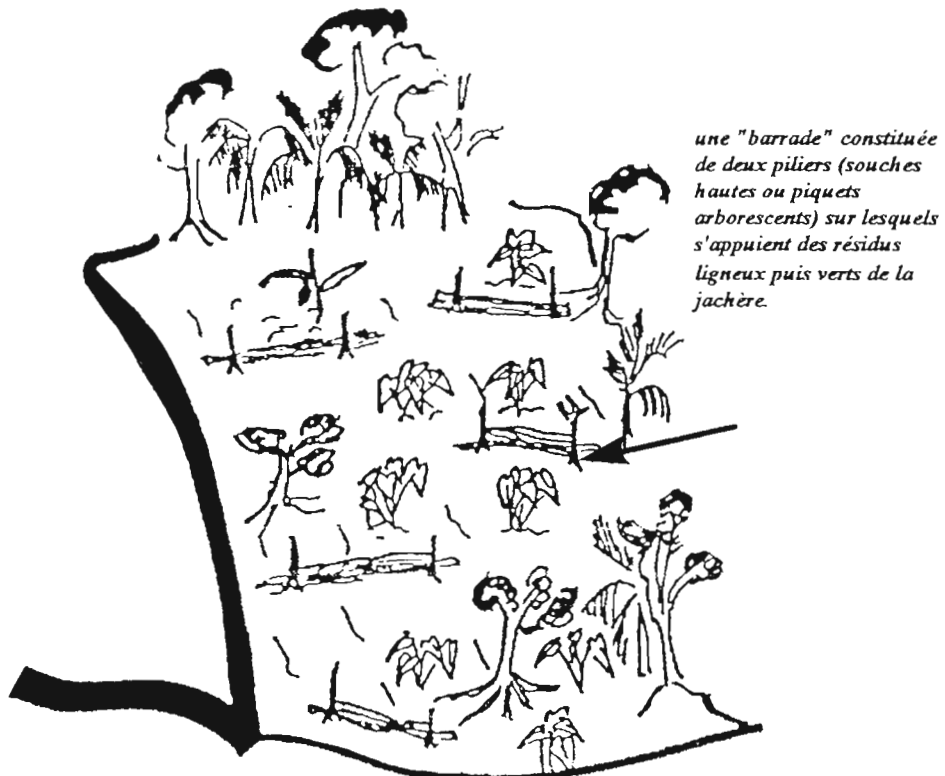


FIGURE 80

Système de rampes de paille (d'après Smolikowski)



lorsqu'elle se trouve en quantité importante car sa décomposition serait trop lente. Ce brûlis permet une préparation rapide des sols mais aussi libère une grande quantité d'éléments minéraux disponibles rapidement en début de culture. Cette technique a cependant certains désavantages : sur sols pentus, elle favorise le ruissellement et le décapage et ne permet pas, par enfouissement, une meilleure rétention de l'eau et un enrichissement en matière organique; s'ils sont bien pourvu en matière organique, la dégradation est moindre mais l'érosion diffuse est importante.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION DIFFUSE

Elle se caractérise par une érosion en nappe. Elle est présente dans les unités 2 et 3 sur les pentes et dans l'Unité 1 sur les sols dégradés de forte pente.

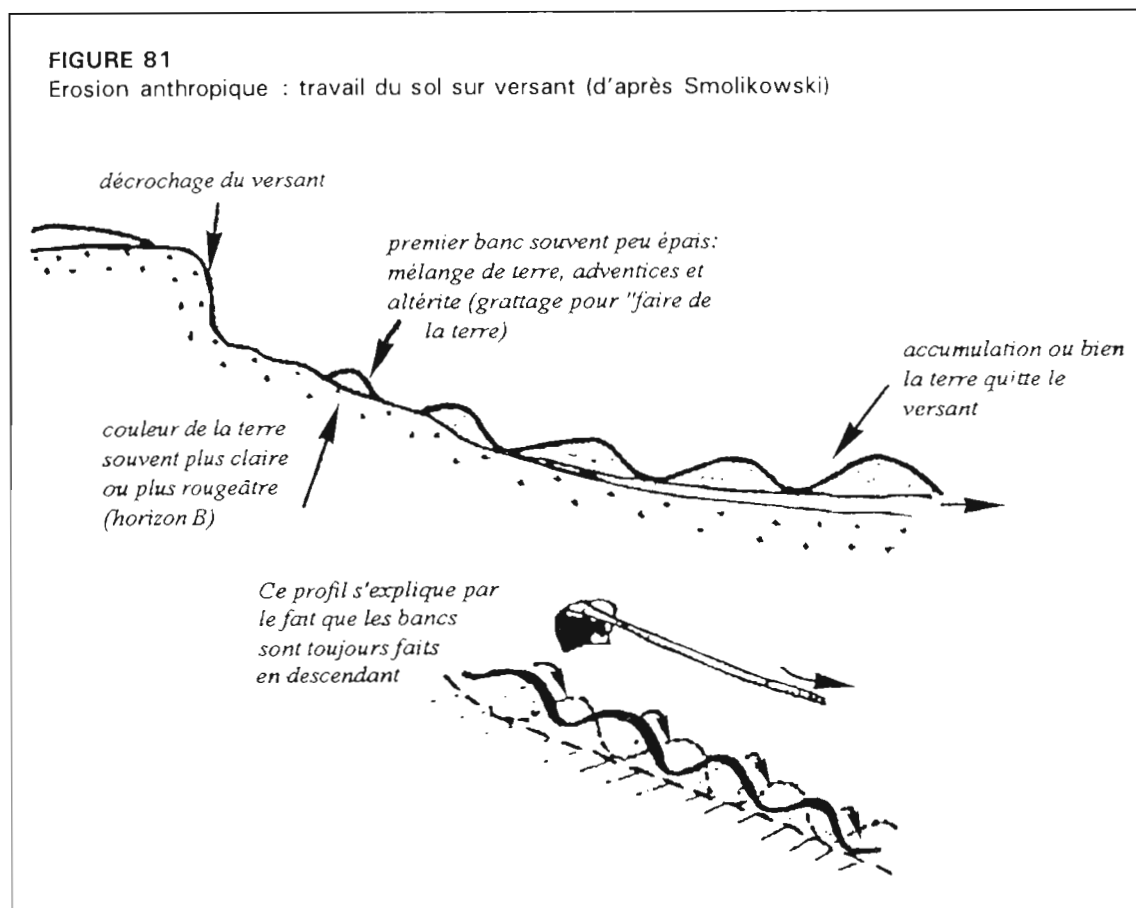
Les paysans utilisent des techniques de lutte traditionnelles mais dont l'efficacité est limitée. Elles ont toutefois l'avantage d'être bien intégrées aux systèmes de culture et pourraient donc être améliorées:

- **Les billons horizontaux** (figure 79) sur pente sont insuffisants pour enrayer l'érosion. Ils n'ont qu'un impact limité sur le ruissellement et suivent rarement les courbes de niveau. Aussi, lorsqu'ils sont trop longs, il se crée des points de concentration de l'eau et les billons cèdent, permettant ainsi un début d'érosion linéaire lors de très fortes pluies.
- **Les rampes de paille** sont largement utilisées mais sont peu efficaces. Ce sont des petites barrières (figure 80) constituées de deux piliers de ligneux enfoncés dans le sol sur lesquels s'appuient d'autres résidus ligneux avec des résidus verts de la jachère après défriche (clayonnage). Ces ouvrages ne sont pas pérennes et ne peuvent avoir d'effets cumulatifs d'une année sur l'autre. De plus leur horizontalité est approximative et leur perméabilité trop grande.
- **Les haies vives** constituées de diverses espèces pourraient avoir une certaine efficacité. Malheureusement, elles ne concernent que les parcelles proches des habitations (jardins de type A et B), c'est à dire sur de faibles pentes et en propriété. De plus elles sont surtout établies en clôtures et ne sont donc pas disposées en courbe de niveau. Leur principal rôle est de lutter contre le vol et la divagation des animaux. Les espèces utilisées ne sont pas apâtées par le bétail et produisent peu de biomasse. Une fois de plus, l'investissement est réalisé sur les terrains où la sécurité foncière est la plus grande.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION LINEAIRE

Pour éviter les rigoles ou les griffes, les techniques de clayonnage sont également utilisées par les paysans, mais elles sont plus rares du fait que ces formes d'érosion se manifestent surtout dans les unités 3 et 4 où la végétation est plus rare.

Pour les petites et moyennes ravines les agriculteurs construisent des petits seuils en matériel végétal ou en pierres, mais cette pratique n'est pas courante et nécessite des



précautions et de l'entretien : l'ouvrage est bien souvent fragile et emporté lors des grosses pluies.

LUTTE CONTRE L'ÉROSION EN MASSE

Il n'y a pas de lutte traditionnelle contre cette forme d'érosion. De plus ces phénomènes sont souvent accélérés par le travail du sol réalisé par les paysans sur les pentes. En effet, chaque année, au moment de la préparation des buttes ou des billons, l'exploitant travaillant de haut en bas, provoque une "descente" d'une portion de la terre (figure 81). Il y a donc glissement progressif des matériaux de la couche superficielle.

UNE FORME DE GESTION DE LA BIOMASSE: LES JARDINS BOISÉS

Nous avons déjà parlé de l'existence de la strate arborée dans les différents jardins et de leur répartition spatiale dans les différentes unités écologiques (figure 77). L'arbre, malgré ce qu'on en dit, joue toujours un rôle très important dans l'espace haïtien. Ce rôle est parfois en évolution ou en régression suivant les situations. Mais leur gestion est étroitement liée aux

facteurs de production des systèmes d'exploitations (tenure foncière, niveau de revenu, mode de conduite de l'élevage, forme de l'héritage¹, etc...).

Le paysan haïtien est conscient du rôle des espaces boisés sur l'environnement (meilleure infiltration des eaux de pluies, production de biomasse, diminution des phénomènes de battance et de l'érosion en masse). Mais les contraintes exogènes (pression foncière, revenu faible d'où vente de charbon de bois) et endogènes à l'exploitation font qu'il lui est souvent difficile de gérer et maintenir ce patrimoine.

De plus, le système traditionnel d'élevage au piquet exclut les plantations. L'élevage, de par son rôle d'épargne et de revenu monétaire, reste prioritaire sur l'arbre. Les plantations d'espèces arborescentes ou arbustives nécessitent un changement profond des modes de conduite de l'élevage.

Toutes ces techniques traditionnelles de lutte anti-érosive confirment que le paysan haïtien est artisan du paysage agraire. Mais si sa faculté d'adaptation est remarquable, il faut reconnaître que la logique de production ainsi que la dynamique suivies par la société rurale haïtienne, induisent des points de rupture remettant en cause la reproductibilité de certains systèmes. On distinguera parmi les causes principales:

- Un espace agraire très contraignant exposé aux érosions de toutes formes.
- Des problèmes fonciers, obstacles à l'aménagement de parcelle ou de versant et favorisant également l'érosion.
- Des changements brutaux dans les techniques issus de ruptures économiques (marché du café) obligeant le paysan à introduire de nouvelles cultures ou tout du moins à les cultiver à une échelle nouvelle et plus intensifiées, ce qui accélère les processus de dégradation (défriches et cultures sarclées).
- Cette intensification ne permet plus au stock de matière organique de se renouveler. Il n'y a plus assez de restitutions. De même, le travail du sol accélère le glissement de la couverture pédologique: en quelques années (6 à 8) une terre "mêlée" peut devenir une terre "finie".

Conclusion: il faut renforcer les techniques traditionnelles paysannes de gestion de l'eau et de la fertilité des sols ainsi que les techniques culturales afin d'améliorer la gestion des eaux de surface, augmenter les apports organiques (puis minéraux), et améliorer la couverture végétale en favorisant l'embocagement.

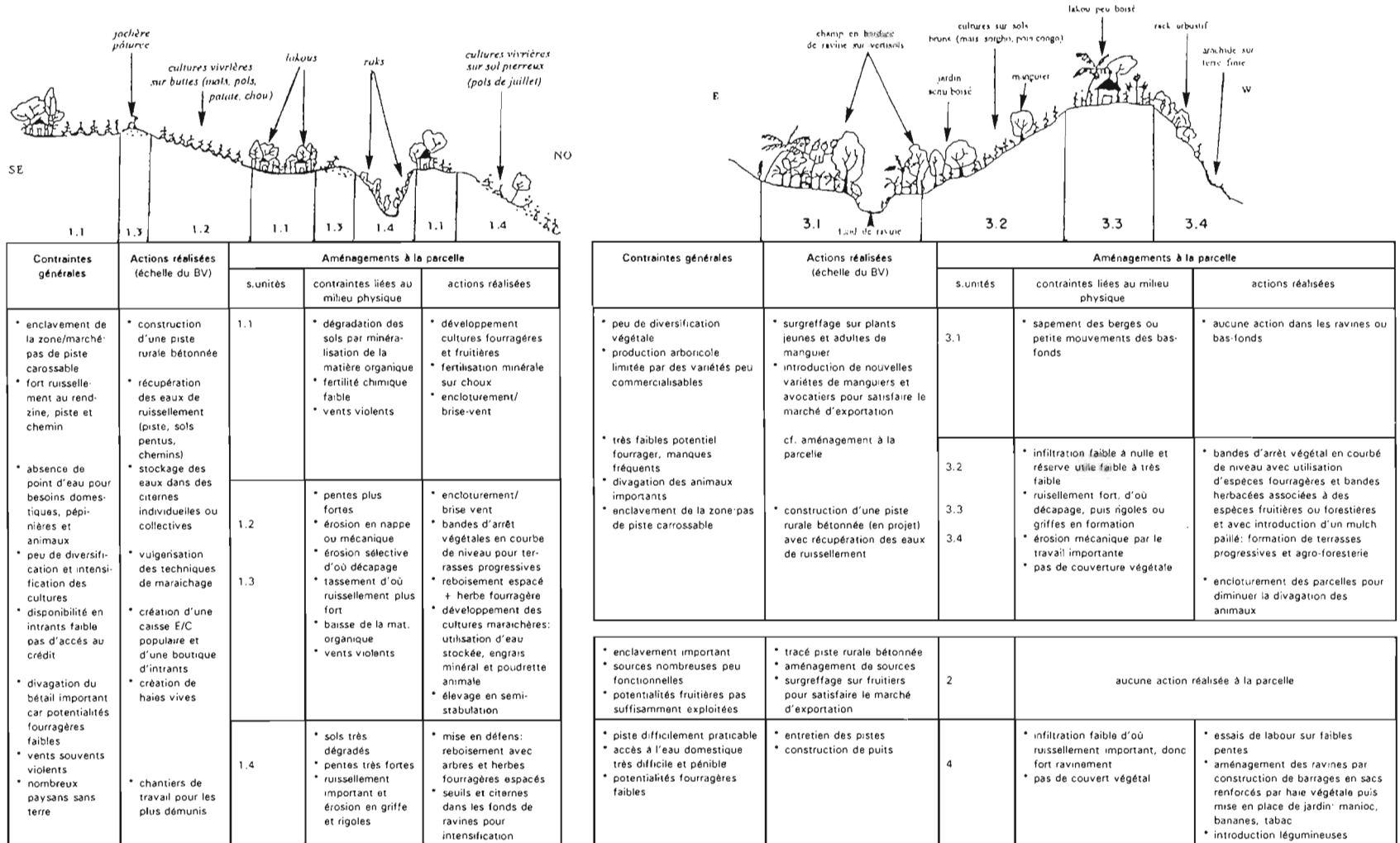
LES ACTIONS D'AMELIORATIONS ENGAGEES [planches photographiques 20 et 21]

Depuis quelques années le projet "Salagnac" a mis en place une série d'actions importantes (filière maraîchère, magasin d'intrants géré par une association paysanne, caisse populaire d'épargne et de crédit, citernes individuelles et communautaires). La situation était idéale

¹ Généralement après la mort du couple-exploitant, le jardin "pré-kaye" peut être conservé, divisé en plusieurs jardins A, ou détruit (coupe des arbres et partage des cultures) puis abandonné. Le nombre d'héritiers rendant impossible un partage équitable des biens : l'espace devient une terre indivise.

FIGURE 82

Types d'aménagement et principales actions de développement réalisés dans les sous-unités agro-écologiques du transect (d'après Smolikowski, 1991)



pour qu'un projet s'investisse sur la gestion de l'environnement (PRATIC) en s'appuyant sur cette dynamique.

Actuellement, en matière d'intensification de la production végétale, trois filières présentent un avenir prometteur pour les zones de montagne densément peuplée:

- Le couple maraîchage-cultures vivrières: les cultures maraîchères sont des têtes d'assolement qui financent l'apport d'engrais minéraux permettant souvent de doubler les rendements des cultures vivrières.
- L'arboriculture fruitière : un marché important se développe vers les Etats-Unis.
- L'élevage bovin laitier.

Les solutions envisagées ont permis de répondre aux problèmes que posent la production et les exploitations agricoles à l'échelle du bassin versant et de la parcelle. Ainsi, pour chacune des unités agro-écologiques des propositions techniques ont été testées (figure 82).

Il s'agissait de:

- Gérer l'eau de surface
- Gérer la fertilité et la biomasse
- Gérer l'élevage
- Développer l'agroforesterie
- Accompagner ces propositions par des actions complémentaires

PROPOSITIONS POUR MIEUX GERER LES EAUX DE SURFACE

Capture du ruissellement, diversion et mise en valeur des eaux dangereuses

La capture de ces eaux s'est faite surtout dans les unités 1 et 2 . Elle permet:

- **La protection des zones à bonnes potentialités agricoles** (jardins A et B, sols à bon potentiel) contre les eaux de ruissellement. Ainsi la construction de trois kilomètres de piste bétonnée (60 FF/m) en aval des terres à fort ruissellement (rendzines) et en amont des sols ferrallitiques a été réalisée et a permis la récupération de ces eaux. Cette piste rurale sert d'impluvium. Elle est protégée par des murettes et renforcée par des canaux – exutoires vers les ravines torrentielles.
- **L'amélioration des disponibilités en eau**, totalement absente en zone 1, pour les besoins domestiques, l'irrigation d'appoint pour l'établissement de petites pépinières maraîchères individuelles avant saison et l'abreuvement du bétail en semi-stabulation. Enfin, il permet d'augmenter la disponibilité en main d'oeuvre de l'exploitation en la libérant des corvées longues et pénibles d'approvisionnement en eau (de 2 à 3 heures/jour).

Ces eaux sont stockées soit dans des citernes collectives de plein champ (de 50 à 150 m³) lorsqu'elles proviennent des pistes, chemins ou sols pentus érodés, soit dans des citernes individuelles (8 à 12 m³) lorsqu'elles proviennent des toits des maisons. Environ 20 citernes de plein champ ont été réalisées (200 FF/m³) et 550 citernes individuelles (180 FF/m³).

De même, des seuils en pierre (unité 1) favorisant le piégeage des transports solides et des écoulements d'eau dans les petites ravines ont été construits afin de créer des îlots de fertilité valorisés rapidement par les agriculteurs.

Toutes ces infrastructures ont également permis:

- **Le désenclavement de ces zones d'accès difficile:** la piste rurale facilite le transport de la production agricole vers les marchés et permettra, à terme, de diminuer la charge élevée en animaux de bât utilisés pour le transport des produits. Ceci pourrait permettre de réduire en partie le surpâturage.
- **L'amélioration immédiatement perceptible du revenu par la création d'emplois** pour les plus démunis (salaires distribués pour les constructions des ouvrages dits "communautaires": piste, citernes, murettes de protection et seuils)

Le choix des ouvrages et de leur emplacement est fait à partir de l'étude de chaque sous-bassin et avec la participation des paysans: il a été déterminé les zones à fort ruissellement, les zones à bonnes potentialités agricoles à protéger, les emplacements pour déverser les excès d'eau dans les ravines torrentielles, le passage de la piste. Le raisonnement a parfois intégré des éléments des systèmes de production: construction des citernes à proximité des zones où le maraîchage est déjà bien développé.

Infiltration maximum et dispersion de l'énergie du ruissellement

Plusieurs techniques permettant une meilleure infiltration ont été utilisées sur de nombreuses parcelles paysannes essentiellement dans les unités 1 et 3. Il s'agit simultanément de **techniques culturelles comme le paillage** et de **l'établissement de haies vives**, c'est à dire de l'implantation d'une végétation pérenne, en courbe de niveau. Tous ces aménagements, en jouant le rôle de bandes d'arrêt des sédiments transportés lors du travail du sol (érosion de masse provoquée par le travail de "haut en bas" lors de la préparation des terres) et pendant les fortes pluies par l'érosion en nappe, devraient conduire à moyen terme à la mise en place de **terrasses progressives**. Ce procédé nécessite un entretien simple, particulier et régulier. Il s'appuie sur les techniques traditionnelles de clayonnage et de clôture en haies vives, et permet de ralentir le ruissellement lorsque la haie est renforcée par ses propres résidus végétaux (coupe des ligneux lors de son exploitation et son entretien) et des résidus de récolte (branchage et paille) qui s'appuie contre cette végétation pérenne. Il faut cependant renforcer la végétation vivante dans les zones fragiles et placer de nouveaux filtres de résidus végétaux lorsque les anciens sont détruits ou recouverts de terre afin d'éviter la formation de brèches.

La mise en place de haies vives est une des techniques la plus vulgarisée par le projet. Cette technique est évidemment plus bénéfique sur les sols basaltiques (unité 3) car la vitesse d'altération des matériaux est très rapide et les possibilités de restaurer la fertilité du milieu après sa dégradation sont excellentes.

Sur le calcaire (unité 1), ces possibilités sont extrêmement réduites. Cette technique est intéressante sur des parcelles ayant conservé de bonnes potentialités.

En ce qui concerne l'unité 2, peu d'aménagements de ce type ont été réalisés. Cette zone présente encore une bonne couverture arborescente et n'a pas été considérée comme prioritaire par les projets.

Pour la plaine d'Aquin (unité 4) ces techniques de haies vives sont utilisées pour aménager les fonds de ravines. La mise en place de barrages végétalisés se fait sur les atterrissements (sols plus profonds, riches en matières organiques et à bonne humidité) provenant de l'érosion torrentielle provoquée par les pluies et bloquée par des petits barrages en sacs de terre. Cette retenue permet la culture d'espèces économiquement rentables tel que les bananiers, les ananas et les cocotiers.

PROPOSITIONS POUR MIEUX GERER LA FERTILITE DES SOLS ET LA BIOMASSE

Il est primordial, si l'on veut augmenter la productivité des terres et du travail, de procéder à une meilleure gestion de l'eau, mais aussi à une meilleure gestion des nutriments et de la matière organique.

Ainsi, pour améliorer le "turn over" et le cycle des nutriments, il convient de revoir l'utilisation de la biomasse disponible. Celle-ci devrait considérablement augmenter avec la production des haies vives nouvellement implantées.

Le projet a commencé à vulgariser l'**utilisation d'un paillis non enfoui** avec un mélange de résidus de *Leucaena* ou de *Gliricidia sepium* et de paille de maïs ou de sorgho dans les unités 1 et 3 sur les sols pentus. Sur les sols basaltiques, il est probable que cette couverture permettra de résoudre 80% des problèmes de ruissellement et d'érosion. Sur les sols calcaires, elle permettra d'améliorer considérablement le bilan de matière organique souvent très déficitaire. Cette technique se développe déjà avec beaucoup de réussite sur les parcelles maraîchères, où sont épandus des engrais minéraux et organiques sous forme de poudrette bien localisée. L'association poudrette-paille permet la production de "vrai fumier" qui fixe mieux l'azote des déjections.

PROPOSITIONS POUR MIEUX GERER L'ELEVAGE

C'est une épargne qui tourne vite, exceptée pour les bovins. Cependant, sa conduite, en Haïti, présente actuellement de nombreux inconvénients:

- Libre, il empêche et détruit tous les aménagements biologiques.
- Au piquet, il tasse le sol, provoque le surpâturage et encourage le ruissellement.

Cependant, sous l'impact du projet Salagnac/Aquin qui intervient sur la production laitière, l'élevage tend vers une conduite en "semi-stabulation": en étable durant la nuit, puis au piquet durant la journée ou promenade vers les points d'eau. Cette technique de conduite de l'élevage a pu se développer grâce à une augmentation de la production de fourrage (haies vives), à la multiplication des points d'eau (citernes), mais également à la multiplication des clôtures de protection qui réduisent la divagation du bétail.

TABLEAU 42

Choix des espèces utilisées en fonction des facteurs agro-écologiques et des types de structures (d'après Brochet et Smolikowski, 1990)

sous unités	clôtures végétales		haies en courbe de niveau			plantations en ligne ou dispersées
	conduites en arbre	conduites en arbuste	conduites en arbre	conduites en arbuste	herbacées	
1.1	. <i>Grevillea robusta</i> . <i>Cedrela odorata</i> (cèdre) . <i>Morus alba</i> (murier)	. <i>Hibiscus rosasinensis</i> (choublack) . <i>Erythrina indica</i> (pignon) . <i>Comocladia domingensis</i> (bois pagnol)	. <i>Citrus maxima</i> (chadequier) . <i>Citrus sinensis</i> (oranger) . <i>Cedrela odorata</i>	. <i>Leucaena diversifolia</i> . <i>Gliricidia sepium</i> . <i>Hibiscus rosasinensis</i>	. <i>Panicum maximum</i> (h. de guinée) . <i>Pennisetum purpureum</i> (h. éléphant)	néant
1.2	. <i>Grevillea robusta</i> . <i>Pinus occidentalis</i> (bois pin) . <i>Ocotea leucoxyton</i> (laurier sable)	. <i>Erythrina indica</i> . <i>Gilberta arborea</i> (bois négresse) . <i>Comocladia domingensis</i> . <i>Bursera simaruba</i> (gommier)	idem 1.1 + . <i>Grevillea robusta</i>	. <i>Leucaena diversifolia</i> . <i>Hibiscus rosasinensis</i>	. <i>Pennisetum purpureum</i> . <i>Tripsacum laxum</i> (H. guatemala)	néant
1.3	. <i>Pinus occidentalis</i> . <i>Casuarina equis.</i> (filao)	idem 1.2 + . <i>Leucaena diversifolia</i>	. <i>Pinus occidentalis</i> . <i>Casuarina equiset.</i>	idem 1.2	. <i>Pennisetum purpureum</i>	. <i>Pinus occident.</i> . <i>Casuarina equis.</i>
1.4	idem 1.3	idem 1.3	. <i>Persea americana</i> (avocatier)	néant	néant	idem 1.3
2	PAS D'INTERVENTION					
3.1	néant					. <i>Persea americana</i> . <i>Mangifera ind.</i>
3.2	. <i>Swietenia mahogany</i> (acajou) . <i>Macrocatalpa longissima</i> (chêne) . <i>Lisyloa latisiliqua</i> (tavernon) . <i>Pithecellobium saman</i>	. <i>Gliricidia sepium</i> . <i>Leucaena leucocephala</i> . <i>Jatropha curcas</i> (médecinier)	. <i>Persea americana</i> . <i>Mangifera indica</i> . <i>Citrus aurantifolia</i> (lime) . <i>Annona reticulata</i> (cachiman coeur de boeuf)	. <i>Gliricidia sepium</i> . <i>Hibiscus rosasinensis</i>	. <i>Pennisetum purpureum</i>	néant
3.3 et 3.4	. <i>Haematoxylon campechianum</i> (campêche) . <i>Lisyloa latisiliqua</i>	. <i>Jatropha curcas</i> . <i>Gliricidia sepium</i>	. <i>Anacardium occidentale</i> . <i>Citrus aurantif</i> . <i>Annona reticulata</i>	. <i>Gliricidia sepium</i> . <i>Leucaena leucocephala</i>	néant	néant
4	Aménagement de ravines →		. <i>Annona reticulata</i> . <i>Mangifera indica</i> . <i>Tamarindus indica</i>	néant	. <i>Musa</i> sp. . <i>Pennisetum purpureum</i> . <i>Ananas</i>	néant

L'IMPORTANCE DE L'AGROFORESTERIE DANS LES TECHNIQUES PROPOSEES

Les techniques agroforestières développées par le projet permettent de répondre à plusieurs nécessités simultanément:

- Amélioration de l'infiltration par ralentissement des écoulements.
- Augmentation de la production de biomasse (environ 3 à 5 tonnes/hectare/an si la distance entre les talus est d'environ 10 mètres) qui peut être utilisée pour améliorer la fertilité par une restitution organique en répandant sur le sol les résidus issus de la taille des arbustes-légumineuses. Ainsi cette biomasse restitue rapidement et de façon plus progressive les nutriments. Enfin, elle est très utile pour l'alimentation du bétail (coupe des graminées et légumineuses), pour la production de bois de feu, et, à plus long terme, pour la production de fruits et de bois d'œuvre.
- Réduction, par synergie avec les effets précédents, des problèmes d'érosion en bloquant les divers processus de transport des éléments solides.
- Amélioration de la protection contre les vents et la divagation des animaux.

L'objectif prioritaire n'est pas de reforester tous les espaces dégradés mais plutôt de :

- **Couvrir les pentes de 40 à 60% en réimplantant un parc aéré** afin de ralentir la migration de la couverture pédologique par la plantation d'arbres sur les terres très dégradées et de façon éparse sur les parcelles. Dans les unités 1, 2 (calcaire-marneux) et 3, des espèces fruitières (150/ha) sont installées dans des cuvettes de 0,5 m³ avec une bonne concentration de matière organique.
- **Cloisonner le paysage par des talus complexes** et en marquant la bordure des parcelles avec des haies brise-vent forestières/fourragères tout en favorisant la mise en place de terrasses progressives. L'installation de clôtures de protection contre la divagation des animaux, comme brise-vent et aussi comme fixation du talus (passage d'une route, d'un chemin), permettent également de marquer la "propriété" et incitent à une plus grande intensification de la parcelle (mise en place de cultures maraîchères, plantation de fruitiers). La technique du macro-bouturage est utilisée pour l'implantation des clôtures ensuite renforcées par la plantation d'arbres forestiers.

Diverses espèces ont été utilisées (tableau 42) pour la mise en place de ces aménagements. Elles tiennent compte des facteurs de production (tenure, éloignement, SAU), des besoins des exploitations (fourrage, bois, fruits, etc.) mais aussi des potentialités du milieu physique à l'échelle de la parcelle, suivant les sous-unités décrites précédemment. Ces espèces sont réparties sur l'aménagement de façon raisonnée :

- Herbes fourragères sur les talus en formation afin de jouer un rôle fixateur et de 2ème filtre.
- Haies vives de légumineuses conduits en arbuste (2 à 3 tailles/an) en amont du talus tous les 25 cm.

- Arbres forestiers ou fruitiers en aval (ou en amont sur des sols très humides) espacés de 5 à 8 m suivant l'écartement entre chaque talus.

LES ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT

Elles sont indispensables et concernent :

- **L'introduction de cultures plus valorisantes** : les cultures maraîchères. Cette diversification des cultures dans les unités 1 et 2 est la courroie de transmission entre aménagement, amélioration de la fertilité des sols, et augmentation de la productivité et de la production, le corollaire étant une augmentation du revenu. C'est parce que ces productions de rente se développent de plus en plus que les paysans souhaitent maintenant mieux protéger et donc mieux gérer leur espace. Les actions complémentaires doivent accompagner l'aménagement et la culture du chou le confirme. Cette culture nécessite un investissement important de la part des paysans (semences, engrais, matière organique, eau, produits de traitement) et bien que souvent plantée sur des jardins C ou D, ces derniers souhaitent que ceux-ci soient aménagés (brise-vent, clôture, plantation d'herbe pour valoriser au mieux les engrais, citernes à proximité, arbres fruitiers) afin de permettre une protection et de bien rentabiliser son investissement. Ainsi, c'est la première fois que le transfert de fertilité s'effectue vers les jardins C ou D.
- **Les actions sur l'élevage** : l'effort est mis actuellement sur l'augmentation de la production de lait qui passe par des actions d'amélioration de l'alimentation, des conduites et des facteurs génétiques.
- **La diversification des productions fruitières** : plusieurs campagnes de surgreffage (les greffes sont effectuées sur des arbres adultes de plus de 5 ans) ont été réalisées sur l'ensemble du transect pour introduire des variétés améliorées (oranges, mandarines et pamplemousses pour le marché américain) ou de contre saisons (mangiers, avocatiers) pour le marché national.
- **L'amélioration de la sécurité foncière** : les aménagements proposés constituent un investissement important en travail, parfois en argent. Pour le paysan, ces aménagements dont la rentabilité n'est pas immédiate sont d'autant plus importants que la sécurité foncière est bonne. Dans bien des cas un propriétaire peut vouloir reprendre sa parcelle jusqu'alors placée en fermage ou en métayage ou bien en augmenter la rente ou le fermage. Pour cette raison la majorité des aménagements l'ont été sur des parcelles en faire valoir direct, ce qui limite les interventions à l'échelle du versant ou du sous bassin versant.

De la même façon, l'application de techniques d'intensification (utilisation d'engrais minéral et organique) se fera difficilement si la parcelle est en métayage voire en fermage de courte durée bien que la rentabilité peut être immédiate. En effet cet investissement peut profiter au propriétaire qui peut souhaiter récupérer son terrain l'année suivante. Nous avons vu qu'en général les parcelles les plus dégradées concernent les parcelles où la sécurité foncière est la plus mauvaise et qu'il y a toujours des exportations de ces parcelles vers les autres.

Des essais de baux à long terme (8 à 10 ans) ont été réalisés lors de la signature du contrat entre le projet, le propriétaire et le fermier (le cas est plus complexe avec les métayers), permettant ainsi une plus grande sécurité sur le foncier et donnant au fermier le droit de jouir de la production, résultat de ses investissements.

- **Les expérimentations en milieu paysan** : elles sont très importantes et doivent avoir un aspect démonstratif. Elles ont consisté à :
 - Des essais d'introduction de la technique en billons cloisonnés en remplacement des buttes à patate sur ferrallitiques des fortes pentes (sous-unités 12). Cet essai n'a pu être prolongé.
 - Des essais sur différentes structures biologiques horizontales avec différents matériels végétaux (*Gliricidia sepium*, *Calliandra*).
 - Des études plus rigoureuses sur les risques d'érosion par rapport au ruissellement pour différents systèmes de cultures, sur l'impact des haies en courbe de niveau et de leurs techniques de gestion sur les bilans (hydrique, fertilité, érosion, production de biomasse). Ces essais n'ont pu être réalisés suite aux événements politiques.

CONCLUSIONS

Il y a eu en Haïti beaucoup de projets de développement rural sectoriels qui ont abouti souvent à déséquilibrer le milieu physique par la mise en place d'aménagements mal intégrés et rarement entretenus.

Avec la GCES un nouvel espoir se dégage dans les méthodes d'approche pour l'intervention dans le milieu rural. Ces méthodes démontrent qu'il n'est pas contradictoire de concevoir un développement de la production agricole (intensification et diversification des productions végétales et animales, amélioration de la productivité) tout en protégeant et en conservant l'environnement (fertilité, conservation des sols et de l'eau) véritable support de ces productions. Cette stratégie doit s'identifier au paysage humain. Sa réussite dépend de la connaissance du fonctionnement des systèmes d'exploitation et de celle du milieu physique et plus particulièrement du potentiel sol.

Les problèmes d'érosion sont extrêmement variés dus à la grande diversité des milieux physiques et socio-économiques. Cependant les paysans continuent à utiliser des techniques de gestion du milieu "é moindre déséquilibre". Il est absolument nécessaire de s'appuyer sur elles et de les améliorer si l'on souhaite trouver des solutions intégrées. C'est une garantie de leur adoption par les paysans et de la continuité des actions d'aménagement, d'intensification de la production et de protection de l'environnement.



Chapitre 13

L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur

PHENOMENE NATUREL ET PHENOMENE HISTORIQUE

PROBLEMATIQUE

Bien que l'Equateur soit un petit pays (270 000 km²) à l'échelle du continent latino-américain, on y observe, cependant, une mosaïque exceptionnelle de paysages. Cette diversité, caractérisée par la juxtaposition sur de courtes distances d'écosystèmes froids, tempérés et chauds, est due à la présence, à cette latitude, de l'énorme barrière montagneuse des Andes, appelée localement "Sierra". Cette cordillère, qui occupe le centre du pays, du nord au sud, est bordée à l'ouest par la côte pacifique et à l'est par le piedmont amazonien. Coïncée entre 2 plaines basses, la Sierra constitue donc un milieu typiquement montagnard aux dénivelées topographiques impressionnantes.

Les activités humaines, traditionnellement agricoles, ont dû s'adapter à ce milieu de haute montagne. Très tôt, durant les 2000 ans qui précèdent la conquête espagnole, la Sierra est le siège d'une agriculture florissante car la population, qui ne dépasse pas 200 000 habitants, a pu développer ainsi une agriculture en équilibre avec le milieu. En effet, ces sociétés d'antan pratiquaient spontanément la diversification des cultures, l'utilisation des terres sur plusieurs étages écologiques et l'irrigation dont les canaux épousaient les contours d'un dense réseau de terrasses. Au cours des siècles, l'histoire troublée de la conquête espagnole puis, plus proche de nous, les effets sociaux de la pression démographique ont fait évoluer cette situation vers un déséquilibre des rapports homme-milieu. Actuellement, l'expansion de la frontière agricole progresse en altitude et se heurte aux contraintes imposées par la montagne (climat, pente). C'est dans ce contexte que s'est développée la structure du "minifundio" qui, dans des conditions très difficiles, de petites parcelles vivrières inférieures à 1 ha, se heurte à des problèmes aigus d'érosion.

L'EROSION DES SOLS: DIAGNOSTIC ET ORIGINE

PHENOMENE NATUREL: UN MILIEU MONTAGNARD

La Sierra est un énorme bourrelet montagneux, de 100 à 120 km de largeur, dédoublé en deux cordillères parallèles. Entre celles-ci, se trouve une dépression qui est formée par une succession de bassins d'effondrement.

TABLEAU 43

La structure agraire en Equateur de 1954 à 1985 : nombre d'exploitations et superficie occupée (exprimés en %)

Taille en ha	1954		1974		1985	
	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie
0-20	90	17	85	19	83	20
20-100	8	18	12	34	15	44
> 100	2	64	2	48	1	35

Les principaux types de relief sont les suivants:

- **dans la zone intra-andine**, on distingue 2 niveaux de bassins. D'une part, ceux situés à une altitude inférieure à 2400 m. Il s'agit d'une unité relativement plane (pente de 0 à 20 %) et déprimée, couverte par une végétation arbustive xérophYTE discontinue. La population groupée en petits villages pratique la culture irriguée: canne à sucre, arbres fruitiers et légumes. Les traces d'érosion sont partout manifestes aussi bien dans les zones mal protégées par cette végétation que dans les zones irriguées où la maîtrise de l'eau est insuffisante. D'autre part, un niveau, compris entre 2400 et 3200 m, qui regroupe la majorité des paysages de la Sierra. On y observe:
 - un réseau dense de ravins et de "cañons", témoins d'une active érosion régressive, où les pentes dépassent 70 %. Il n'existe qu'une maigre agriculture sur des sols de faible épaisseur;
 - des surfaces planes d'accumulation (moins de 10 % de pente), où sont établies les grandes propriétés d'élevage bovin ("haciendas"). Entre ces surfaces et les ravins, on observe une morphologie plus irrégulière (25-50%) qui se caractérise par un recul marqué des petites parcelles de maïs face à une érosion ancienne, très active;
 - soit des glacis-terrasses, soit des cônes de déjections en s'élevant au contact de la zone montagneuse. Sur les pentes inférieures à 25 %, s'est développé un élevage prospère dans le cadre de grandes ou de moyennes exploitations: haciendas (centaines d'hectares) et "fincas" (dizaines d'hectares). Plus haut, entre 3000 et 3200 m, apparaissent les premiers versants escarpés où s'est installée la première vague de minifundio. Cette mutation a provoqué une accélération de l'érosion;
- **sur les cordillères**, à partir de 3200 m (De Noni, Viennot, 1985), commencent les hautes terres andines où s'étend massivement, depuis une dizaine d'années, le minifundio. Jusqu'à 3800 m, on y cultive la pomme de terre, l'oignon, la fève, l'orge, la quinoa, le lupin ..., relayés par un élevage extensif d'ovins et de caprins, parfois de lamas qui atteint 4400 m. L'emprise de plus en plus marquée de l'agriculture sur le milieu s'accompagne de phénomènes actifs de dégradation;
- enfin **sur les flancs extérieurs**, les pentes sont encore plus fortes (plus de 70 %). L'érosion est localisée en fonction de l'instabilité des sols qui s'accroît lorsque la végétation naturelle et les prairies sont progressivement remplacées par les cultures tropicales.

La montagne andine constitue donc un milieu très propice aux manifestations érosives (actions des pluies et de l'homme) parce qu'il existe une relation entre l'inclinaison de la pente, la vitesse de l'écoulement, le débit du ruissellement et l'intensité de l'érosion.

PHENOMENE HISTORIQUE: MINIFUNDIO ET HACIENDAS

La Sierra est la région du pays où la pression de l'homme sur le sol est la plus importante. En règle générale, les fortes densités de population correspondent au minifundio, celles-ci (Delaunay, 1989) varient de 50 hab./km² à plus de 200 hab./km² (région de Ambato). Selon les recensements du Ministère de l'Agriculture, la répartition (nombre et superficie) des unités de production est donnée au tableau 43.

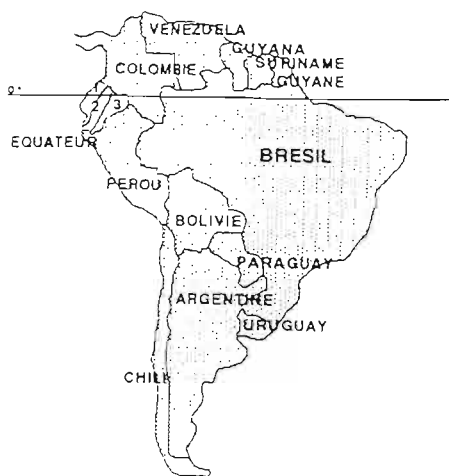
Quelles que soient les années considérées, les exploitations du minifundio (0 à 20 ha) regroupent plus de 80 % des unités de production, en revanche elles n'occupent que 20 % des terres agricoles situées, en général, dans un milieu difficile à valoriser. Les bonnes terres planes des bassins, gérées par les haciendas, supportent un élevage bovin extensif. Cette situation paradoxale résulte d'un héritage historique où l'on peut dégager les trois périodes clés suivantes (De Noni, 1986):

- les conséquences historiques de la conquête espagnole ont été dramatiques car elles ont provoqué une baisse généralisée de la population (guerre, maladies...etc.). Dans la pratique, les indigènes, traités comme main-d'oeuvre servile, sont regroupés dans de vastes domaines agricoles. Cette structure évoluera rapidement vers de grandes fermes plus connues sous le vocable "d'haciendas";
- depuis le début du siècle, l'Equateur est le siège d'une formidable croissance démographique qui touche particulièrement la population rurale. En 1586, la population totale du pays s'élève environ à 150 000 habitants. Entre 1780 et 1886, la population double et passe de 500 000 à 1 000 000 d'habitants. Entre 1886 (Estrada, 1977) et 1989, la population est multipliée par dix et atteint 10 500 000 d'habitants;
- face au mécontentement général d'une population qui croît rapidement, le gouvernement militaire de l'époque proclame, le 11 juillet 1964, la loi de réforme agraire qui vise à abolir l'état de servitude ("huasipungo") auquel est réduite, depuis la conquête, l'abondante main-d'oeuvre des haciendas. Les grands propriétaires terriens sont donc contraints de renoncer à leurs privilèges et de céder une partie de leurs terroirs. Ainsi se développe la structure agraire du minifundio, gérée par de petits paysans indigènes désormais libres et propriétaires du sol. Dans la réalité, les haciendas ont conservé les meilleures terres et n'ont attribué à la réforme agraire que les terroirs inhospitaliers.

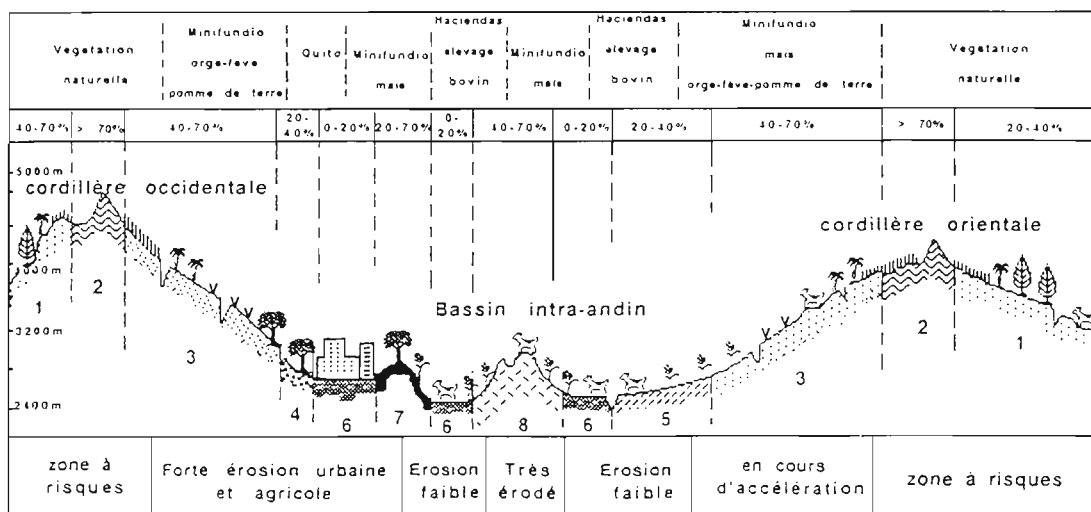
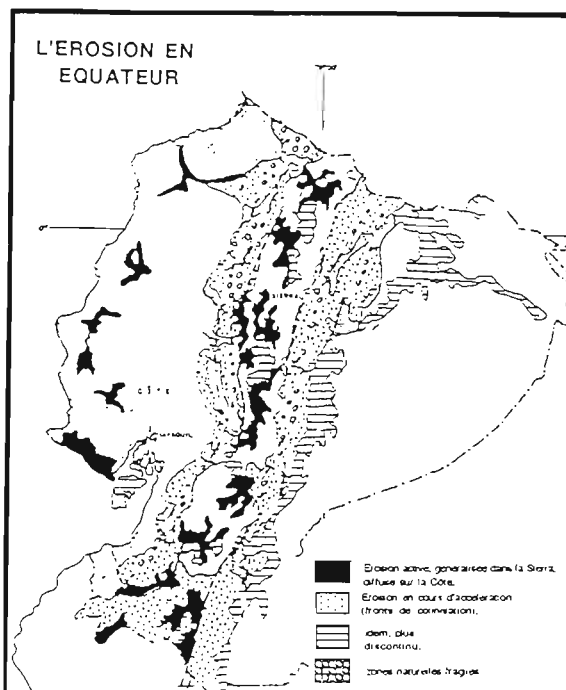
LES RISQUES : L'IMPACT DE L'EROSION EN MILIEU AGRICOLE

L'association - "montagne + forte pression de l'homme sur le sol" - est à l'origine de l'érosion chronique qui affecte les paysages andins. Tout au long de la dépression andine, on constate, sur quelques années seulement et à mesure que progressent les fronts de colonisation, la multiplication des formes d'érosion ainsi que l'extension des terres abandonnées.

FIGURE 83
Erosion et conservation des sols en Equateur (Projet DNA-ORSTOM)



L'EQUATEUR:
-270.000 km.² > 10 . 10⁵ HAB.
- 3 REGIONS NATURELLES
1. la Costa
2. la Sierra
3. l'Amazonie



LES PRINCIPALES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES

relief	Caldera, neck 2	Versants ravinés cônes. 1,3,4	Glacis-terrasse 5	Horst, graben 5 7	Volcan éteint 8
sols	cryandept orthent	dystrandept hydrandept	argustoll haplustoll	haolustoll/ cangahua	cangahua dunustoll
mat. org. %	9-12	6-15	5	3-4	<1
pH	5,5	5-6	>7	>7	7-8,5
CEC meq/100g	2-10	15-40	20-80	20-50	20-30
T/S %	10-80	2-50	80-100	100	100
granulo	St	L	AL	AL	LSA
remarques	sem grossiers	H ²⁺ 50-250%	smectite		incure CO3Ca

IMPORTANCE SPATIALE DE L'ÉROSION AGRICOLE (figure 83)

L'étude cartographique, réalisée conjointement par le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Élevage (MAG) et l'ORSTOM, sur "Les principaux processus d'érosion en Equateur" (Almeida, De Noni *et al.*, 1983.; De Noni, Viennot, 1986), permet d'évaluer que globalement 50 % (35% dans les Andes de 15% sur la Côte et l'Amazonie) de la superficie du pays est affectée par des processus de dégradation. Dans les Andes, région la plus dégradée, on doit distinguer les deux zones suivantes:

- le bassin intra-andin (1500-3000 m) où il ne reste que très peu de sols arables. Dans la partie nord et centre de ce bassin, on observe une formation remarquable par son extension et son épaisseur qui est une cendre volcanique indurée, stérile en l'état pour l'agriculture, appelée localement "cangahua". Cette formation affleure lorsque les sols et les cendres volcaniques ont été décapés par l'érosion;
- les hautes terres et les flancs extérieurs des Cordillères (3200 m-4000 m) où se développe une érosion active à mesure que se déplace le front de colonisation agricole, très actif depuis une vingtaine d'années. Dans ces régions, la couverture pédologique est encore continue mais présente localement des signes alarmants de dégradation.

PREDOMINANCE DE L'ÉROSION HYDRIQUE

Dans la Sierra, durant les 9 mois de culture, de septembre à mai, l'érosion hydrique est très active (l'érosion éolienne n'est pas considérée ici car elle est plus localisée et affecte peu les cultures). Les principales manifestations hydriques sont les suivantes (De Noni, Trujillo, 1989) :

- le ruissellement diffus et concentré est le type de processus le plus généralisé quelle que soit l'origine géologique des sols: formations pyroclastiques du nord et d'une grande partie du centre de la Sierra et matériaux volcano-sédimentaires de la province de Loja, au sud. Les paysages soumis à ces processus présentent des sols peu épais aux horizons tronqués et griffés par des formes d'érosion en U ou en V selon les conditions de cohésion et de granulométrie du matériel. Rapidement, ces formes linéaires évoluent en "bad lands";
- le ruissellement associé à de petits mouvements en masse (15-20 % de pente). Ce processus est significatif des sols qui présentent une discontinuité texturale où on observe un matériau argileux d'origine volcanique, riche en montmorillonite, reposant en concordance sur une formation indurée de type "cangahua". Les processus se combinent pour modeler la surface du sol en abrupts d'érosion dont les plus hauts atteignent 3 à 5 mètres de commandement. C'est le cas dans la partie nord (Provinces de Carchi et Pichincha) et centrale (Province de Chimborazo) de la Sierra;
- les mouvements de masse sont localisés dans le bassin de Cuenca, plus précisément au Sud de celui-ci dans la zone de Cumbe où l'ensemble du paysage présente un aspect moutonné. L'érosion se manifeste par des loupes et des niches de solifluxion qui se développent sur des reliefs collinaires aux sols argileux non volcaniques.

TABLEAU 44

Pertes en terre sur les parcelles de 50 m² (période 1981-84 et année 1982)

Année	ALANGASI		ILALO	
	Mollisols et cangahua		Mollisols et cangahua	Cangahua
	Divers traitements (maïs, pâturage) t/ha	Pâturage dégradé t/ha	Mais t/ha	Jachère t/ha
1981-84	62	314	631	71
1982	58	204	421	58

TABLEAU 45

Pertes en terre et pluviométrie annuelles sur les parcelles de 100 m²

		Année 86-87			Année 87-88		
		Pluie tot. annuel. mm	Témoin cult. cultivé	Jachère nue travaillée	Pluie tot. annuel. mm	Témoin cult. cultivé	Jachère nue travaillée
TUMBACO	Erosion t/ha/an Coef. ruis. %	478	3.02 3.7	12.9 6.6	457	42.18 4.4	82.82 15.5
CANGAHUA	Erosion t/ha/an Coef. ruis. %	366	3.8 1.6	56 5.9	308	6.89 1.9	83.6 11.1
MOJANDA	Erosion t/ha/an Coef. ruis. %	588	1.15 0.9	5.9 2	547	0.52 1	96.94 8.4
RIOBAMBA	Erosion t/ha/an Coef. ruis. %	537	1.44 0.9	56.9 23.3	532	52.2 15.5	198.7 21.3

DES PROCESSUS DE RUISSELLEMENT TRES ACTIFS

D'autres études réalisées, par le projet DNA-ORSTOM, sur des parcelles de ruissellement cultivées, de 50 m² (10 m x 5 m) de surface, démontrent aussi l'importance de l'érosion anthropique. Dans le tableau suivant, nous avons regroupé, pour la période 1981-1984, les pertes en terre mesurées sur deux sites situés dans le bassin de Quito, à Alangasi sur 28 % de pente) et à Ilalo sur 33 % de pente (De Noni, Nouvelot, Trujillo, 1984 et 1986). Nous avons réservé une colonne à part pour l'année 1982 durant laquelle a eu lieu la majorité de l'érosion (tableau 44).

Depuis 1986, nous avons élargi notre champ d'action en installant des parcelles de ruissellement plus grandes (20 m x 5 m = 100 m²) et réparties sur plusieurs provinces du pays. Ce nouveau dispositif s'étend désormais sur environ 800 km du nord au sud de la Sierra, depuis la Province de Pichincha jusqu'à celle de Loja. Les parcelles sont de 2 types: parcelle nue travaillée selon le protocole de Wischmeier (Wischmeier et Smith, 1978; Roose, 1968) et parcelle témoin des cultures et pratiques locales. La parcelle nue, modèle de "Wischmeier", n'est pas seulement une parcelle de référence à caractère scientifique et

fondamental, elle reflète également, dans notre cas, des états réels du calendrier agricole: jachère pauvre en végétation herbacée et parcelle nue au moment du semis de l'orge. Pour la période 1986-88, les résultats sont donnés au tableau 45.

De ces résultats, on peut tirer les principaux enseignements suivants (De Noni, Viennot, Trujillo, 1989-90):

- l'érosion sur sol cultivé peut être spectaculaire: par exemple, sur les parcelles de 50 m² l'érosion a dépassé 600 t/ha (période 1981-84) en monoculture du maïs;
- l'irrégularité inter-annuelle des manifestations érosives: à Alangasi et Ilalo, les pertes en terre observées en 1981-83-84 sont faibles par rapport à l'année 1982 où a lieu la majorité de l'érosion. Les résultats subissent également des variations considérables d'une année à l'autre sur les stations: c'est ainsi que par rapport à 86-87, on observe en 87-88, 16 fois plus de terre perdue à Mojanda et 7 fois plus à Tumbaco sur les parcelles Wischmeier, 32 fois plus d'érosion à Tumbaco sur la parcelle témoin;
- l'absence d'une époque érosive bien marquée dans l'année (les cinq pluies les plus érosives, sur un total d'une quarantaine de pluies érosives par année et par station, sont responsables d'une grande partie de l'érosion). Parmi ces pluies, les seules hauteurs ne permettent pas d'expliquer les pertes en terre. En calculant les coefficients de corrélation pour les années 86-87 et 87-88, nous notons que c'est avec l'IM15 ou l'IM30 que l'on observe les meilleures corrélations avec les poids de terre érodée bien que les intensités maximales présentent dans la Sierra des valeurs faibles à moyennes: 15 à 45 mm/h. Les valeurs "R" de l'indice d'érosivité sont ainsi modérées; ils dépassent rarement 100: 60 à Cangahua, 90 sur la station de Tumbaco et 100 à 110 à Mojanda et Riobamba. Cependant, toutes ces valeurs sont également soumises à des variations annuelles et peuvent être exceptionnellement plus élevées et intensément érosives. Sur la parcelle de Ilalo (50 m²), l'érosion dépasse les 400 t/ha/an en 1982; un IM15 de 90 mm/h étant responsable de 270t/ha/jour et un autre de 70 mm/h à 120t/ha/jour de terre perdue.

ABSENCE DE METHODE CONSERVATOIRE ET DEFICIT ALIMENTAIRE

L'histoire de l'utilisation du sol s'est soldée par l'individualisation de 2 types d'exploitants agricoles: de riches propriétaires, les "hacendados", et des paysans marginalisés, les "minifundistes"; ces derniers, pressés par une nécessité vitale de produire plus pour subsister et refoulés dans un milieu difficile, ont été obligés de forcer les conditions du milieu. De telle sorte qu'aujourd'hui, l'absence de pratiques antiérosives adaptées au milieu est flagrante tout au long de la Sierra (De Noni, Viennot, Trujillo, 1986). Par exemple sur les hautes terres densément cultivées des provinces de Chimborazo et de Cotopaxi, on peut observer quelques ouvrages sommaires de conservation des sols qui consistent en barrières vives et petites rigoles. Celles-ci, très superficielles (20-40 cm) et déclives (20 à 25 %) par rapport à un fossé conventionnel, ne peuvent canaliser les excédents d'eau et évoluent rapidement en ravines. De même les haies vives, composées généralement de "siges" (*Gybernum*), sont disposées de manière aléatoire par rapport à la pente dominante. En outre, ces ouvrages, qui bordent les parcelles, ne sont que rarement associés à des labours isohypes.

TABLEAU 46

Evolution de la production agricole dans la Sierra de 1970 à 1985 (en tonnes)

CULTURES	1970	1975	1980	1985
Orge	79 087	62 801	24 350	26 723
Maïs	167 990	90 247	45 266	35 421
Blé	8 1000	64 647	31 113	18 464
Pommes de terre	541 794	499 371	323 222	423 186

TABLEAU 47

Méthodes de conservation testées sur les parcelles améliorées de 1000 m²

Stations	Pente %	Cultures		Méthodes conservatoires	Pertes en terre t/ha/an		Coef. Ruissell. % annuel	
		86-87	87-88		86-87	87-88	86-87	87-88
TUMBACO	20	maïs	maïs	bandes enherbées avec 3 types de fourrage	1.08	0.42	1.5	0.8
CANGAHUA	20	maïs	maïs	murets de cangahua	0.45	0.33	0.1	0.5
MOJANDA	40	orge/pommes de terre/fèves		muret en mottes de terre et gros billons de quinoa	0.38	0.19	0.3	0.1
RIOBAMBA	20	pommes de terre/fèves/orge		bandes enherbées avec association de cultures (orge, fève)	0.43	7.6	0.3	6.2

On observe également un abandon ou une destruction systématique d'anciens ouvrages agricoles hérités des sociétés précolombiennes. Ces vestiges (P. Gondard, F. López, 1983), pour la plupart des terrasses en gradin, sont constitués par des talus de pierres ou de blocs de cendres indurées. A Pimampiro (Province de Imbabura), les talus sont volontairement abattus pour laisser la place à de grandes parcelles moto-mécanisées dans le sens de la pente. De même à proximité de Zhud (province de Cañar), dans une zone de colonisation récente et de moyenne propriété, de larges terrasses au profil concave, témoins de l'ancienne civilisation Cañari, apparaissent sous la végétation arbustive ("chaparral") en cours de défrichage. A Punin et à Flores ainsi qu'à Colta et Chunchi (Province de Chimborazo), il existe également, dans des conditions de pente déjà forte (40-60 %) et à une altitude entre 3200 m et 3600 m, de véritables terrasses séparées par des talus de plusieurs mètres de haut. Une fois encore, les talus intermédiaires ont été abandonnés ou détruits et seuls sont conservés les talus qui servent de limites de propriété. Ceux-ci ne délimitent plus que des "pseudo-terrasses" excessivement larges et pentues, inadaptées aux conditions du milieu.

Pour survivre bien sûr, mais aussi avec l'espoir de s'insérer dans l'économie de marché, les petits paysans ont orienté "le minifundio" vers les cultures qui fournissent les principaux aliments de base de la nourriture locale: céréales (maïs, blé et orge) et tubercules (pommes de terre). Mais face aux contraintes naturelles, il n'a pas été possible de développer une

agriculture rentable de telle sorte que la situation actuelle du "minifundio" est précaire: selon les régions, l'autosubsistance est à peine garantie; quant aux excédents de production, ils sont rares et tributaires d'une année culturale exceptionnelle. Les données du Ministère de l'Agriculture sur l'évolution de la production agricole au cours des 15 dernières années illustrent parfaitement cet état de crise (tableau 46).

On notera que la baisse de la production agricole est générale et vertigineuse pour toutes ces cultures entre 1970 et 1980. Elle est particulièrement spectaculaire pour le maïs et le blé qui sont traditionnellement les aliments de base de la population rurale.

PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS [planche photographique 22]

Le "minifundio", face à son isolement physique sur les hautes terres, a besoin en premier lieu d'une assistance technique plus présente. L'intervention de l'Etat doit s'accroître sous différentes formes: organisation de cours pratiques de formation à l'agriculture de montagne, entraînement à l'utilisation d'engrais, de semences améliorées et bien sûr de pratiques conservatoires...etc. Il est nécessaire, dans les meilleurs délais, d'intensifier les relations entre "minifundistes", techniciens et ingénieurs agronomes et de coupler des actions de recherche et de développement.

C'est dans cet esprit que s'est développé le programme de coopération internationale entre la Direction Nationale Agricole (DNA) du Ministère équatorien de l'Agriculture et l'ORSTOM. Ce projet, relativement pionnier au niveau du pays ainsi que de la région andine (De Noni, Viennot, 1987 et 1989), a mis en place des stations d'étude implantées chez l'agriculteur et co-géré avec ce dernier. Les sites sont équipés de grandes parcelles de ruissellement de 1000 m² de surface (50 m x 20 m) où sont étudiés les effets de l'érosion en condition de culture améliorée par des ouvrages simples de conservation. Les stations ont été installées en 1986 en même temps que les parcelles de 100 m² mentionnées auparavant (voir tableau 46) de telle manière à pouvoir comparer les effets de l'érosion en conditions de culture traditionnelle (parcelles de 100 m²) et améliorée (parcelles de 1000 m²). Parallèlement à la construction des parcelles, une enquête de terrain socio-agronomique a été réalisée pour déterminer dans la zone d'études les différents systèmes de cultures; l'accent ayant été mis en particulier sur l'identification de méthodes de conservation. Face à l'absence de pratiques traditionnelles, il a été décidé, pour contrer l'énergie du ruissellement, de tester l'efficacité d'ouvrages perméables isohypses simples qui évolueraient progressivement en pseudo-terrasses (Roose, 1971, 1986 et 87). Pour être proche du paysan, on a choisi des matériaux qu'il utilise communément sur le terrain, en général pour clore les parcelles. On distingue les 3 principaux types de matériaux suivants: les murets en mottes de terre ou en blocs de cendre volcanique indurée ("cangahua") et plus simplement les bandes enherbées en pâturage ou cultivées (quinoa ou lupin). Les méthodes testées, pour la période 1986-88, ont donné les résultats au tableau 47.

Ces résultats démontrent que des systèmes de conservation simples, à la portée du paysan local – billonnage selon les courbes de niveau associé à des bandes enherbées ou à des murets de terre – font diminuer notablement l'érosion. C'est systématiquement sur les parcelles améliorées, quelles que soient les stations, que les poids de terre sont minimaux et l'érosion admissible, en général inférieure à 8 t/ha/an et le plus souvent voisine de 1 t/ha/an.

Les rendements y sont également meilleurs: par exemple à Mojanda, la récolte de pommes de terre a été de 4,3 t/ha sur la parcelle témoin et de 7.6 t/ha sur la parcelle améliorée.

A Riobamba, pour la période allant du 20 septembre au 12 novembre 1987 (date de semis), 3 pluies érosives ont donné lieu à 33,8 t/ha de terre perdue sur la parcelle traditionnelle dont le sol a été préparé pour le lit de semences. Pour ces mêmes dates et pour un labour identique, l'érosion sur la parcelle améliorée n'est que d'une 1,1 t/ha. Le même phénomène est observé sur la station de Tumbaco : la seule pluie du 19 octobre 1987, en pleine jachère, le semis n'ayant lieu qu'un mois plus tard le 18 novembre, a provoqué une perte en terre de 34 t/ha. Pour la période considérée, la parcelle améliorée ne perd que 140 kg.

Bien qu'encourageants, ces résultats préliminaires nous montrent que tous les problèmes ne sont pas maîtrisés et, qu'avant d'entreprendre des actions de sensibilisation et de vulgarisation, il est indispensable d'effectuer des observations préalables en conditions expérimentales et en milieu paysan. Cette remarque est fondée sur l'exemple fourni par les transformations morphométriques des murets en mottes d'herbe de la station de Mojanda. Au départ, ceux-ci étaient constitués par deux rangées superposées de mottes de terre d'une hauteur d'environ 30 cm. Puis, progressivement, l'agriculteur au cours de l'année culturale, bien plus que l'érosion qui est insignifiante sur cette parcelle (0,2 à 0.3 t/ha/an), a induit avec la large lame de sa pioche ("asadon") des déplacements considérables de terre, du haut vers le bas de la parcelle. Les travaux de labour ou de piochage, qui commencent toujours au pied des murets, donnent lieu à un surcreusement à la base de ceux-ci, puis la terre est tirée vers le bas de la parcelle jusqu'à ce qu'un autre muret fasse obstacle. Ces déplacements simultanés de terre, par creusement à l'avant des murets et par remblaiement à l'arrière de ceux-ci, nous ont obligé à surélever à plusieurs reprises la hauteur des talus. Sur 20 mois d'observation, celle-ci est passée de 30 cm à 1,30 m ; le profil rectiligne initial du versant évoluant progressivement vers un profil en terrasses. On estime que, chaque année, le poids de terre qui s'accumule de cette façon derrière les murets est d'environ 40 tonnes par 100 m linéaire.

CONCLUSIONS

Les Andes, parce qu'elles sont un obstacle orographique majeur à l'échelle planétaire, constituent un milieu naturel propice aux manifestations érosives. En outre en Equateur, ce phénomène est exacerbé, depuis deux décennies au moins, par l'impact sur le milieu du minifundio qui a connu une histoire troublée le conduisant à une marginalisation sur des terres inhospitalières. Grâce à un travail conjoint avec ce petit paysannat local, le projet DNA-ORSTOM a ouvert une voie pionnière et a démontré expérimentalement que la maîtrise de l'érosion, face aux contraintes naturelles et au poids de l'histoire, n'est pas un défi impossible. Sur la base d'ouvrages simples adaptées aux conditions du milieu et acceptés par les hommes, ce type d'opération devrait permettre, à l'échelle d'une génération, de conserver la fertilité des sols, de garantir la qualité des récoltes et globalement d'améliorer les conditions de vie des agriculteurs.

Chapitre 14

Montagne méditerranéenne en Algérie

INTENSIFICATION DE L'AGRICULTURE ... SANS DÉGRADATION

PROBLEMATIQUE

La région nord de l'Algérie est de loin la plus productive, mais aussi une zone très fragile : les montagnes sont jeunes, les roches molles comme les argilites, marnes et schistes alternant avec des roches dures comme les calcaires et les grès. Le climat méditerranéen semi-aride offre des pluies fines peu énergétiques, mais saturantes pendant l'hiver frais et des averses orageuses dangereuses durant les mois torrides de l'été.

Les sols (régosols, vertisols gris, sols bruns calcaires, sols rouges fersiallitiques) sont souvent battants à la pluie, caillouteux, pauvres en matières organiques et carencés en phosphore et azote.

Suite à une succession de colonisations (romaine, turque puis française) et une récente pression démographique (51 habitants par km² en montagne), on peut observer fréquemment des signes de surpâturage (6 moutons à l'hectare) sur des montagnes complètement dénudées. L'érosion en nappe et rigoles, en ravine et en masse, la divagation des oueds et la dégradation des berges, la destruction des routes et l'envasement accéléré des réservoirs en 15 à 20 ans, sont les signes d'une dégradation poussée et généralisée des paysages de cette zone.

Face à ces graves problèmes d'érosion, les forestiers et les ingénieurs du génie rural ont développé, de 1940 à 1970, une stratégie d'équipement lourd du milieu rural (DRS) qui comporte :

- la reforestation des hautes vallées et des sommets des montagnes ;
- la correction des torrents et des ravines ;
- le terrassement des terres de culture : on a aménagé des banquettes algériennes sur plus de 300 000 hectares en 30 ans (coût 5 à 10 000 FF/ha).

L'objectif principal était de ralentir l'envasement des barrages car le nombre de sites favorables à la construction des réservoirs d'eau est limité.

Mais, en 1977, l'échec de la DRS en milieu rural fut clair. Les paysans refusent le système des banquettes qui leur fait perdre 10 à 20 % de surface cultivable et n'améliore guère la productivité des terres, la production de bois est toujours déficitaire et la vitesse d'envasement ne fait que croître ! Les projets de terrassement furent arrêtés pour des raisons économiques (deuxième crise pétrolière) (Heusch, 1986). Les forestiers ont continué leur oeuvre de reforestation et de correction torrentielle (RTM), mais à part quelques projets d'amélioration foncière (sous-solage des sols bruns à croûte calcaire), on ne fit plus grand chose pour stabiliser les terres cultivées chez les paysans (Roose, 1987).

Les premières mesures d'érosion sur parcelles de ruissellement (Kouidri, Arabi et Roose, 1989) ont conforté l'hypothèse selon laquelle l'érosion en nappe des versants n'apporte qu'une faible part (0,2 à 1 t/ha/an) aux transports solides des oueds (Heusch, 1970 ; Demmak, 1982). Ceci pourrait expliquer pourquoi l'envasement des réservoirs était peu réduit, même si on avait beau reforester ou terrasser les pentes.

L'essentiel se passe autour des oueds : ravinement, éboulement en masse des versants entaillés par la divagation des oueds sont les sources majeures de sédiments directement mobilisés par la rivière lors des plus fortes crues.

Néanmoins, le ruissellement en nappe issu des versants peut être très élevé... jusqu'à 80 % des plus fortes averses tombant sur un sol battu, fermé ou compacté par les surpâturages, les routes, les pistes de bétail, les jachères abandonnées à la vaine pâture.

C'est ce ruissellement qui s'échappe des pentes dénudées qui va créer les ravines, les pointes de crue très dangereuses, le sapement des berges et une sédimentation importante dans les réservoirs.

Aujourd'hui, les industries connaissent des difficultés et tournent au ralenti. Le gouvernement algérien propose le retour à la terre, l'intensification de l'agriculture de montagne, mais il espère que cela pourra se faire sans accélérer la dégradation des montagnes et l'envasement des réservoirs d'eau si indispensables au développement de l'irrigation et au développement tentaculaire des villes.

Pour intéresser le paysan à préserver sa terre et la qualité des eaux de surface, il semble indispensable de répondre d'abord aux problèmes immédiats des paysans : comment améliorer leurs revenus et leur sécurité en améliorant la gestion de l'eau et des nutriments sur les terres en production ?

L'intervention prioritaire n'est plus de fixer les terres ravinées, mais bien d'analyser et d'améliorer les systèmes de production et l'équilibre hydrique et minéral des meilleures terres. La restauration des forêts et l'aménagement des versants ravinés reste la préoccupation majeure de l'Administration forestière.

Selon cette nouvelle approche, s'est développé de 1985 à nos jours un programme de coopération dans le domaine de la recherche et formation avec la participation d'une douzaine de chercheurs de l'INRF et de l'ORSTOM.

Ce programme, nommé "Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols" couvre trois sous programmes :

- deux enquêtes sur l'efficacité de la DRS, d'abord par l'Administration forestière pour localiser les aménagements les plus intéressants, ensuite par une équipe multidisciplinaire de chercheurs pour analyser scientifiquement les raisons des échecs et des réussites.
- l'aménagement de petits bassins versants (terroirs de 20 à 300 ha) près de Médéa, Mascara et Tlemcen.
- l'évaluation quantitative du ruissellement et de l'érosion avec un simulateur de pluies et un réseau de parcelles de ruissellement et de ravines.

Nous nous bornerons ici à rapporter les principaux résultats acquis près de la station INRF de Ouzera (Arabi et Roose, 1990), mais des résultats voisins ont été acquis près de Tlemcen (Mazour, 1992).

DIAGNOSTIC : LES CONDITIONS EXPERIMENTALES

Quinze parcelles de ruissellement (22,2 x 4,5 m) ont été installées sur les champs des paysans autour de la station de recherche de Ouzera à 90 km au sud d'Alger.

Le paysage comporte une série de plateaux calcaires (900 à 1 200 mètres d'altitude), de versants raides (12 à 40 % de pente) et de vallées profondes où coulent des oueds par intermittence.

Les sols sont liés à la lithologie et à la position topographique (Pouget, 1974 ; Aubert, 1987). Il s'agit :

- des lithosols jaune clair sur colluvions de grès calcaires, riches en CaCO₃, mais pauvres en matière organique ;
- des vertisols gris ± foncés sur marnes, bien structurés, 2 % de matières organiques, saturés en calcium, pH 7 à 8, très résistants à la battance, mais sensibles au ravinement et aux mouvements de masse ;
- des sols fersiallitiques rouges sur des grès tendres, pauvres en matière organique, fragiles et instables en surface ;
- des sols bruns calcaires sur des colluvions, 2 à 3 % de matière organique, au profil peu profond, mais bien structuré en surface.

Dans cette zone montagneuse (Atlas Blidéen), la couverture forestière a diminué entre 1982 et 1991 de 18 à 13 %, alors que la vigne et les vergers ont crû de 2 à 7 % et de 8 à 14 %. Cela est caractéristique de la croissance de la population et du développement de l'agriculture de montagne. Les pratiques culturales sont réduites à deux labours pour contrôler les adventices, suivis d'un cover crop pour enfouir les engrais (N33, P45, K90) et réduire un peu la taille des mottes.

TABLEAU 48

Ruissellement (% des pluies), érosion (t/ha/an), rendements (t/ha et revenus nets en dinars (28 Da = 1 US \$) pour les 15 parcelles d'érosion de la station INRF de Ouzera, Algérie (d'après Arabi et Roose, 1992)

	Ruissellement moyen KRAM %	Ruissellement max. KRMMax %	Erosion t/ha/an Med. Max 0	Récolte t/ha/an	Revenu net Da/ha/an 28Da = 1 US\$
Système agro pastoral, vertisol, 12 % pente					
1 - Réf. internationale jachère non travaillée	18,2	7 à <u>86</u>	2,7 (6)	0	0
2 - Amélioré : rotation blé- légumineuses intensifs	0,6 ↘	1 à <u>8</u>	0,11 (0,2)	{ 4,8 grain 3,1 paille 5 haricots	36 200
3 - Amélioré par pâturage de Médicago	0,6 ↘	0 à 9	0,05 (0,3)	{ 6,5 grain 2,2 paille 0,7 grain	35 800
4 - Réf. locale : blé et jachère paturée extensifs	2,1 ↗	7 à <u>16</u>	0,19 (0,3)	{ 0,2 paille	2 500
Système sylvo pastoral, sol brun calcaire, pente 40 %					
5 - Réf. internationale, sol nu	11,3 ↗	<u>34</u> ↗	1,8 (2,7)	-	-
6 - Forêt de pin riche en litière	0,5	1 à 3	0,02 (0,04)	-	-
7 - Mattoral surpaturé	12,0 ↗	3 à 25	1,7 (2,1)	-	-
8 - pâture de diss + litière	0,8	2 à 7	0,03 (0,04)	-	-
Verger d'abricot, sol rouge fersiallitique, pente 35 %					
9 - Réf. internationale, sol nu	15,5 ↗	25 à 50	9 (20) ↗	-	-
10 - Amélioré = abricotier + rotation blé/légumineuse, engrais + bandes	0,6 ↘	0 à 9	0,09 (0,2)	{ 0,8 fruits 6,0 haricots 2,0 paille	42 200
11 - Réf. locale : abricotier 8x8 m	3,1 ↗	11 à 12	0,66 (1,3)	0,7 fruits*	10 000*
Vigne sur pente 30 % sol brun calcaire caillouteux					
12 - Réf. internationales, sol nu	9,5 ↗	16 à <u>36</u>	1,53 (2,3) ↗	-	-
13 - Réf. locale = vigne 30 ans + 2 labours	1,5	3 à 8	0,11 (0,2)	2,8 raisin	34 300
14 - Amélioré = vigne + outillage + herbicides	4,3	8 à 26	0,13 (0,2)	3,0 raisin	35 100
15 - Amélioré = vigne + rotation blé/légumineuses. 2 labours + engrais	0,2	0 à 3	0,004 (0,1)	{ 4,0 raisin 3,4 haricots 1,5 paille	65 400

Med = médiane : Max = maximum en 1990

* La récolte d'abricots est très faible à cause d'une attaque d'insectes.

La moyenne des précipitations de ces 40 dernières années est de 680 mm à Médéa, mais entre 1986 et 1990, les pluies à la station de Ouzera (distante de 7 km) ont varié de 408 à 566 mm et l'indice d'agressivité des pluies (R_{USA} de Wischmeier) a tourné autour de 46.

L'objectif de ces essais est de comparer les risques potentiels de ruissellement et d'érosion sur une parcelle nue travaillée (témoin international) à quatre systèmes de production (une vigne, un verger, un système agropastoral et un système sylvopastoral) répartis sur quatre sols représentatifs de cette zone méditerranéenne semi-aride à hiver doux.

Les améliorations au témoin régional consistent en des labours dressés grossiers, l'usage d'herbicides et de pesticides, de graines sélectionnées, d'une fertilisation équilibrée, une jachère fourragère de légumineuses, des cultures associées en rotation sous le verger. Les paramètres observés sont la pluie (hauteur, intensité, érosivité), le ruissellement (KRAM, le

coefficient annuel moyen, et KR max %, le coefficient maximum pour une forte averse en % de la pluie), l'érosion (suspensions fines et sédiments grossiers), la production de biomasse et de fruits, le revenu net et les paramètres de la surface du sol (surface fermée, ouverte et couverte, humidité de surface).

LES RISQUES

Les pluies ont été déficitaires de 100 à 250 mm par rapport à la moyenne. On n'a enregistré qu'une seule série d'averses importantes, totalisant 130 mm en trois jours, tombées en été sur des sols secs.

Les pluies sont beaucoup moins énergétiques qu'en Afrique de l'Ouest. Le rapport annuel moyen/hauteur annuelle moyenne est de l'ordre de 0,1 à la station de Médéa, 0,5 en Côte d'Ivoire et 0,25 pour les montagnes du Cameroun, du Rwanda et du Burundi.

Le ruissellement (tableau 48) annuel moyen (KRAM %) est modeste (0,5 à 4 % des pluies) et le maximum lors d'une averse, atteint 8 à 36 % (exceptionnellement 40 %). Sur la jachère nue de référence, le ruissellement annuel est encore modeste (10 à 18 %), comparé aux observations en milieu tropical (25 à 40 % en Côte d'Ivoire). Cependant, si le sol dénudé est tassé ou gorgé d'eau en hiver, le ruissellement peut dépasser 50 à 80 % sur marnes et sur sol fersialitique rouge.

Dans des conditions de sol, de pente et de techniques culturales semblables, on observe que la couverture végétale – en particulier les techniques améliorées – ont réduit efficacement les risques d'érosion.

Comme beaucoup d'auteurs, on a remarqué que le labour du sol a amélioré l'infiltration. Par exemple, sous la vigne, sur la parcelle où l'on a remplacé le labour par des herbicides pour maîtriser les adventices, le ruissellement a augmenté significativement car l'horizon superficiel est tassé... mais du même coup, l'érosion a diminué car le matériau est plus cohérent. En cas d'averse exceptionnellement forte, la capacité de stockage d'eau du sol sera vite saturée : le ruissellement pourrait augmenter sur la parcelle labourée au point d'emporter l'horizon travaillé – moins cohérent – tout au moins sur les plus fortes pentes. Cela s'observe souvent sur les champs.

Sous végétation naturelle (garrigue évoluant en prairie ou en forêt), la couverture par la litière étant très importante (+ de 80 % de surface couverte), le ruissellement a été fréquent (sol tassé par le surpâturage), mais jamais dangereux (KR max \leq 7 %). Cependant, nous avons souvent observé en Algérie que des chemins d'eau et des ravines prennent naissance dans les parcours surpâturés (surtout sur les sentiers tracés par les animaux) ou même dans certaines plantations forestières dégradées par le pâturage.

Généralement, le ruissellement démarre après 20 millimètres de pluie si le sol est sec et après 3 millimètres si le sol est compact ou humide. Ce seuil de hauteur de pluie donnant lieu à un ruissellement, dépend évidemment des caractéristiques de chaque averse (intensité, mais aussi capacité à saturer le sol), mais surtout de l'état de la surface du sol (humidité des dix premiers centimètres de sol, présence de fissures, de trous de vers, de croûtes de battance, de litière, de cailloux et de grosses mottes). Les ruissellements les plus abondants ne surviennent que quand toutes les conditions sont optimales, généralement entre novembre et mars - ou durant un orage exceptionnel de l'été (tous les 5 ans).

TABLEAU 49

Influence du type de sol et de la pente (%) sur le ruissellement (%) et l'érosion (t/ha/an) sur des jachères nues (d'après Arabi et Roose, 1992)

	Couverture par les cailloux (%)	Pente (%)	KRAM %	KRMax %	Erosion t/ha/an
Sol brun calcaire (SPK 8)	16	40	11	34	1,8
Sol brun calcaire colluvial (VK15)	20	35	10	36	1,5
Sol rouge fersialitique (ARK9)	0	30	16	50	9,0
Vertisol gris (APK1)	4	12	18	86	2,7

TABLEAU 50

Effet de l'amélioration des pratiques culturales sur le ruissellement (Moyen et Max. en % des pluies), l'érosion (t/ha/an) et sur les revenus nets (1 US\$ = 28 dinars)

Situation		KRAM %	KRMax %	Erosion t/ha/an	Revenu net DA/ha
Agropastoral :	traditionnel	2,1	16	0,189	2 504
	amélioré	0,6	8	0,054	35 810
Sylvopastoral sur sol brun:	dégradé	12,0	25	1,740	?
	reforesté	0,5	3	0,034	?
	enherbé	0,8	7	0,020	?
Verger sur sol rouge fersialitique	traditionnel	3,1	12	0,656	10 000
	amélioré	0,6	9	0,088	42 187
Vigne sur sol brun colluvial	traditionnel	1,5	8,3	0,144	34 333
	amélioré	0,2	2,7	0,009	65 364

L'érosion en nappe a été très modérée (0,1 à 2 t/ha/an) sur les champs cultivés et 1,5 à 18 t/ha/an pour la jachère nue malgré les pentes fortes (12 à 40 %) car l'agressivité des pluies est faible ($R_{USA} < 50$) et les sols sont très résistants ($K = 0,02$ à $0,01$), riches en argile saturée de calcium et souvent caillouteux.

Même si l'érosion atteint 19 t/ha/an (1,27 mm de sol), il faudrait 2,5 siècles pour décaper l'horizon humifère sur 20 centimètres. Expérimentalement, il a été prouvé que l'érosion en nappe évacue sélectivement la matière organique, les colloïdes argileux et limoneux et les nutriments, tandis que l'érosion en rigole décape non sélectivement le sol. Aussi, lorsque l'érosion en rigole se développe, elle décape généralement l'horizon humifère, surtout sur fortes pentes. Si l'érosion en nappe ne semble pas le processus le plus efficace sur les versants, l'érosion en rigole et surtout, l'érosion mécanique sèche par les outils des cultures, semblent les plus actives dans l'évolution des paysages de montagne.

Par exemple à Ouzera, sur un verger planté il y a 30 ans, il manque actuellement 30 centimètres de sol entre les souches des arbres ! Même si l'érosion en nappe mesurée atteint 1,5 t/ha/an (0,1 mm), en 30 ans, le sol aura perdu trois centimètres tandis que 27 centimètres auraient été mobilisés par le "creeping sec" (lors du labour profond exécuté deux fois l'an en croisé au tracteur à chenilles). Le travail du sol augmente donc beaucoup l'évolution des versants des montagnes : il participe à la formation des talus en bordure des champs.

L'érodibilité des sols observés est très faible, même au bout de trois ans de jachère non cultivée ($K = 0,01$ à $0,02$). Cependant, l'érosion en nappe et rigoles augmente d'année en année.

L'érosion fut maximale sur sol rouge fersiallitique (10 à 19 t/ha/an), moyenne pour les vertisols gris (2 à 3 t/ha/an) et minimale pour les sols bruns calcaires (1,5 à 2 t/ha/an). La protection offerte par les cailloux semble très efficace.

Il est difficile de commenter l'aptitude au ruissellement des sols, car les pentes varient en même temps que les types de sol. Par ailleurs, il semble clair que le ruissellement moyen annuel et le ruissellement maximum journalier décroissent lorsque les pentes augmentent, tout au moins sur les jachères nues (tableau 49).

Ce genre de conclusion étonnante avait déjà été énoncée par Heusch au Maroc (1970) et par Roose en Côte d'Ivoire (1973).

Ce résultat remet en cause l'utilisation des équations de Mrs Ramser, Saccardy et autres... pour lesquelles la fréquence des terrasses doit augmenter avec l'inclinaison de la pente. Heusch (1970) a déjà démontré au Maroc que la position du champ dans la toposéquence est parfois plus importante que la pente elle-même.

PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS : INFLUENCE DU SYSTEME CULTURAL [planche photographique 23]

L'amélioration du couvert végétal (grâce à la forte densité des plantes, les engrais, les rotations avec des légumineuses, la culture d'hiver entre les arbres fruitiers et les vignes) a réduit régulièrement, mais modérément, le ruissellement et l'érosion au champ (tableau 50).

Mais ce qui est plus important, c'est l'amélioration très significative des rendements des cultures et des revenus des agriculteurs (voir tableau 48). La culture traditionnelle de céréales peut rapporter 2 500 dinars/ha/an. La rotation céréale-légumineuse améliorée intensive rapporte 35 800 dinars et jusqu'à 42 à 65 000 dinars lorsque cette rotation est introduite entre les rangs des vignes ou des arbres fruitiers.

Ces résultats démontrent qu'il est possible à la fois d'intensifier l'agriculture de montagne et de réduire les risques de dégradation de l'environnement rural.

Les rendements observés sur les parcelles de ruissellement (100 m²) soumises aux systèmes de culture traditionnels sont aussi médiocres que sur le champ des paysans du voisinage (7 q/ha/an de blé d'hiver, 28 quintaux de raisin, huit quintaux d'abricots... ces derniers étant malades). Sur les parcelles d'érosion situées juste à côté, soumises aux pratiques culturales améliorées, les rendements ont atteint 48 à 65 quintaux/ha/an en blé d'hiver, 40 quintaux de raisins, et en plus, 34 quintaux de grains secs de haricots.

De plus, la paille, les feuilles des légumineuses et autres résidus de culture ont aussi augmenté significativement (de 0,2 à 2 ou 3 t/ha/an) de telle sorte que la production animale et la disponibilité en fumier ou en résidus organiques peuvent, à terme, améliorer la fertilité du sol et sa résistance à l'érosion.

Il est probable que la croissance des rendements ne sera pas aussi spectaculaire sur les grandes surfaces que sur les petites parcelles d'érosion (100 m²), mais le premier pas est franchi qui consistait à démontrer qu'on pouvait intensifier l'agriculture... tout en améliorant progressivement l'environnement rural.

Reste à démontrer que l'investissement est rentable ! Après avoir enlevé les coûts supplémentaires des graines améliorées, des engrais, pesticides, herbicides, le travail de préparation du sol et de récolte, il reste aux agriculteurs un revenu net beaucoup plus élevé que pour leurs cultures traditionnelles (5 dinars algériens = 1 FF \approx 0,2 dollars EU en 1992).

1) le parcours extensif dans les bois peut rapporter	500	dinars/ha
2) le blé d'hiver traditionnel	2 500	dinars/ha
3) la vigne ou les vergers d'abricots traditionnels	10 à 17 000	dinars/ha
4) la rotation améliorée : blé x fourrage légumineuse	28 à 33 000	dinars/ha
5) l'association de cette rotation entre les vignes et les abricotiers	42 à 65 000	dinars/ha

Ceci tend à montrer qu'on peut multiplier les revenus par dix pour les céréales et par trois pour les vignes si on passe au système intensif. Si on accepte de passer de la rotation traditionnelle blé-jachère pâturée au verger intensifié, les revenus sont multipliés par vingt. C'est un privilège des montagnes humides au climat doux, car il n'est pas toujours possible d'intensifier la culture si le sol est trop superficiel et les pluies inférieures à 400 millimètres.

Dans ces conditions, il est possible d'intéresser les paysans à modifier leur système de culture et à améliorer leurs méthodes culturales pour mieux conserver l'eau et la fertilité des sols. D'ailleurs, après trois années d'expérimentation, les paysans de la colline ont copié nos méthodes et ont obtenu des rendements supérieurs aux nôtres en 1991, année où les pluies ont été bien réparties.

CONCLUSIONS

Nous n'avons pas encore eu le temps d'appliquer tout ce qu'implique la GCES au niveau de l'aménagement d'un terroir ou d'un petit bassin versant. Il faut du temps, à la fois pour modifier les habitudes paysannes, et rassembler les moyens de démontrer sur le terrain qu'on peut améliorer la productivité des terres, augmenter les revenus paysans, et réduire les risques de dégradation des paysages de moyenne montagne méditerranéenne.

Chapitre 15

Le pays de Caux, région tempérée de grande culture du nord-ouest de la France

PROTEGER LE RESEAU DE DRAINAGE ET AMELIORER L'INFILTRATION

PROBLEMATIQUE

En Pays de Caux comme dans une grande partie du Nord-Ouest de la France, le ruissellement, l'érosion des terres et les inondations deviennent plus fréquentes et plus importantes depuis 20 ans (Auzet *et al.*, 1987; Papy *et al.*, 1988).

Une volonté réelle de conservation des eaux et des sols se développe depuis quelques années. Initialement, seules les actions de lutte contre les inondations catastrophiques étaient engagées. Ces dernières années, les collectivités publiques de Seine Maritime ont consacré 20 millions de francs pour la création de retenues. Actuellement, nous cherchons à développer des actions de longue durée et globales à l'échelle des bassins versants (Opération Régionale créée en 1985 avec la Chambre d'Agriculture).

Ces actions recouvrent deux volets :

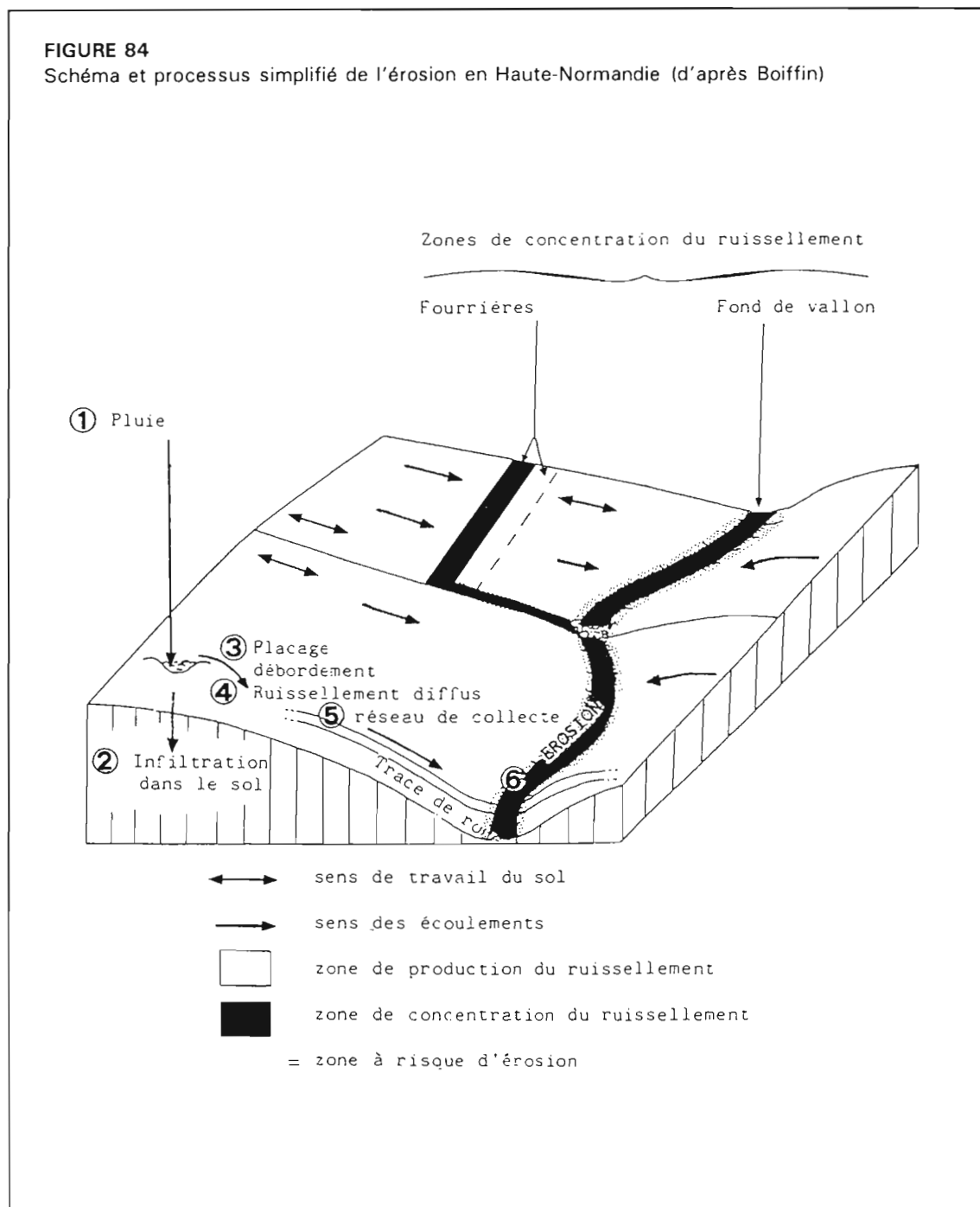
- un volet agronomique qui a pour objectif de réduire l'érosion des terres et le ruissellement au niveau des versants, en agissant sur la rugosité et la capacité d'infiltration de la surface du sol. Ce sont des actions à caractère individuel.
- un volet hydraulique pour créer des aménagements collectifs afin de gérer les écoulements inévitables et donc limiter l'érosion et les inondations dans les vallées.

Sur le plan agricole, nous avons développé progressivement différentes techniques qui soient parfaitement intégrées aux systèmes de production existants. Pour cela, nous avons procédé en plusieurs étapes :

- définition précise du type d'érosion, et des paramètres sur lesquels il est possible d'agir (Boiffin *et al.*, 1988).

FIGURE 84

Schéma et processus simplifié de l'érosion en Haute-Normandie (d'après Boiffin)



- quantification des phénomènes (SRAE rapports internes 1989-1990-1991) (Daix, 1991; Ouvry, 1992).
- analyse des systèmes de production et des marges de manoeuvre (au plan financier et technique) et du temps disponible dans les exploitations (Papy *et al.*, 1988; Poujade, 1989).

- recherche et diffusion des solutions agronomiques adaptées aux systèmes de production pour favoriser le flacage et l'infiltration tout en préservant les potentialités et la rentabilité des parcelles et les facilités de travail du sol. A terme, nous voulons que les agriculteurs intègrent ces éléments de lutte anti-érosive dans leurs pratiques culturales (Ouvry, 1987).
- les solutions sont d'abord mises en place individuellement pour que chacun prenne conscience qu'une marge de manoeuvre existe à son niveau, puis collectivement pour aboutir à une prise en charge globale du bassin versant agricole par la collectivité rurale.

DIAGNOSTIC DU MILIEU

Le Pays de Caux est situé sur le littoral du département de la Seine-Maritime. C'est un plateau crayeux au relief ondulé, avec des pentes douces (1 à 5% pour les terres labourées) omniprésentes. Il se caractérise par l'absence de réseau hydrologique à cause du karst présent sous le plateau, mais aussi par l'existence d'un réseau très dense de vallées sèches. Sur ce plateau, il se développe une agriculture intensive basée sur la polyculture.

La couverture pédologique est assez homogène. Des sols bruns faiblement lessivés se sont développés sur le limon éolien holocène qui recouvre le plateau. Dans l'horizon labouré, le taux d'argile varie entre 10% et 15% et la teneur en matière organique des limons cultivés avoisine 1,6%.

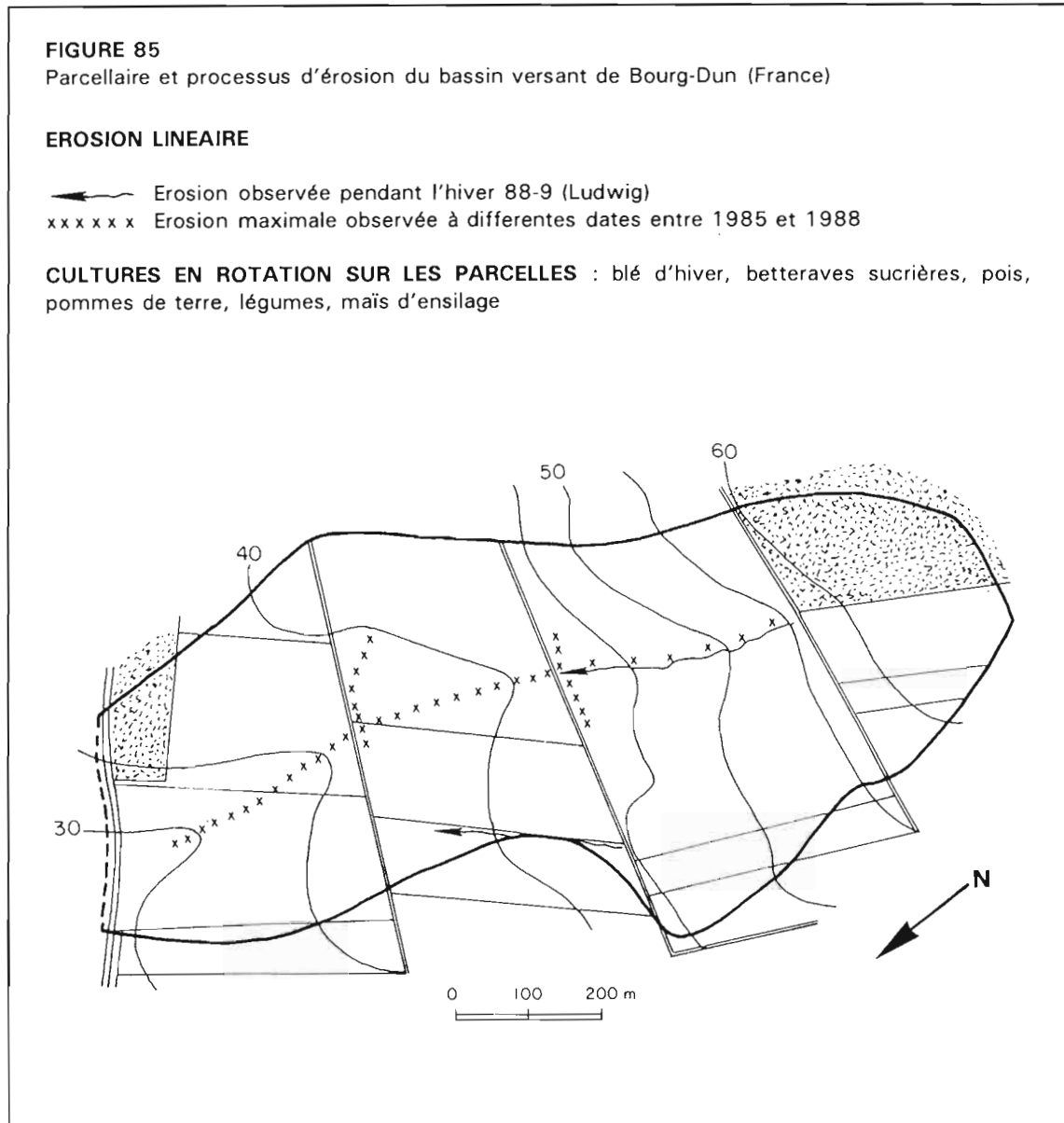
Le climat est de type océanique. Les pluies sont très peu agressives. La hauteur moyenne annuelle de pluie atteint 900 mm avec une répartition homogène toute l'année. La pluie journalière de fréquence décennale n'est que de 48 mm/jour.

LES RISQUES : PROCESSUS ET DEGATS

Le processus d'érosion est typique de l'érosion par ruissellement concentré, caractérisé par Ouvry (1982-1986); Boiffin *et al.* (1986-1988); Auzet (1987); Ludwig (1989). Les figures d'érosion sont linéaires et généralement localisées sur l'axe du talweg. Elles peuvent aussi apparaître sur les fourrières (bouts de champ) ou toutes lignes de concentration intra-parcellaire. Exceptionnellement, les formes d'érosion sont disposées en chevelu ou en rigole parallèle sur les versants de pentes supérieures à 4 %. Les dégâts se produisent fréquemment en hiver alors que l'intensité des pluies ne dépasse pas 5 mm/h et parfois lors des orages estivaux. Les pertes de terre sont toujours localisées dans le talweg, mais très variables, de 0 à 500 m³/km² suivant les années (Ludwig, 1989 ; Ouvry, 1992).

A partir du type d'érosion, Boiffin *et al.* (1986) divisent le bassin versant en deux zones spatiales et fonctionnelles distinctes (figure 84) :

- le secteur constitué par les versants et la tête du bassin versant qui produisent le ruissellement;
- les zones de talweg et autres lignes de concentration où les écoulements incisent le sol.



Les ruissellements dépendent principalement des critères liés à l'état de la surface du sol dans cette région aux pluies peu agressives, notamment de la rugosité de surface, de la vitesse de formation et de l'extension des croûtes de battance.

En hiver, après le dernier travail du sol, 30 à 40 mm de pluie cumulée, indépendamment de l'intensité, suffisent pour former les premières pellicules de battance et croûtes sédimentaires. Quant à la rugosité des lits de semence, elle détermine une détention superficielle au maximum entre 3 à 6 mm et au minimum entre 0 et 1 mm suivant le type de culture, le précédent cultural, l'humidité du sol au labour, le type d'outil utilisé pour préparer le lit de semence, le nombre de passages d'outils, les équipements des tracteurs (Boiffin *et al.*, 1988).

SOLUTIONS ET DEMARCHES ADOPTEES

Du processus d'érosion concentré, il résulte deux conséquences :

- les solutions à rechercher et à préconiser sur les versants et dans les talwegs doivent être différenciées contrairement aux régions où le splash joue un rôle prépondérant ; les agriculteurs doivent apprendre à traiter différemment ces zones distinctes au sein d'une même parcelle ;
- toutes les exploitations n'ont pas le même degré de motivation suivant que leurs parcelles sont situées en amont du bassin versant ou dans un vallon à risque d'érosion.

L'exemple d'un bassin versant au Bourg Dun présenté sur la figure 85 couvre 60 ha, dont 5 ha étaient encore en prairie en 1991. Le remembrement date de 1957. Il a délimité des parcelles parallèles et orientées dans le sens de la pente. Les systèmes de production des quatre exploitations sont de type polyculture intensive.

Les phénomènes d'érosion sont apparus régulièrement depuis 1978 dans l'axe du talweg comme l'indique la figure 84 sur différents secteurs. Pendant l'hiver 88-89, Ludwig (1989) a estimé le volume des rigoles à 100,8 m³.

A partir de 1986, certains agriculteurs ont souhaité lutter contre les phénomènes d'érosion des terres. Pour eux, les rigoles et ravines infranchissables par le matériel de pulvérisation et de récolte constituaient une gêne suffisamment importante pour motiver une action. Les pertes de temps pour tous les travaux des champs, les pertes de surfaces induites par toutes les zones non récoltables ou différents problèmes de zones non désherbées ont été des facteurs beaucoup plus importants pour les exploitants que les griffes d'érosion. Les pertes de surface créées par les incisions sur le talweg sont d'ailleurs très faibles (entre 0,1 et 1 % des terres labourées).

DEMARCHE UTILISEE

Avec ces agriculteurs, dans un premier temps nous avons établi une relation de confiance mutuelle appuyée sur une bonne connaissance des contraintes agronomiques, des systèmes de culture et de l'économie des exploitations.

Dans un deuxième temps, les agriculteurs ont testé à l'échelle de la parcelle les solutions agronomiques très simples, sans coût et généralement basées sur l'observation et le bon sens. A partir de là, une prise de conscience s'est opérée. Les phénomènes de ruissellement et d'érosion ne sont plus une fatalité mais ils peuvent être infléchis. L'étape délicate réside dans la différenciation de zones distinctes à l'intérieur d'une parcelle puis dans le choix de solutions adaptées. Par la suite, il faudra réaliser des actions collectives de maîtrise et gestion des eaux à l'échelle du bassin versant.

LES PRATIQUES CULTURALES

Toutes les solutions visent premièrement à constituer une forte rugosité à la surface du sol avec une macroporosité importante, et deuxièmement à retarder la formation des croûtes de battance, puis à les briser (Ouvry, 1987).

FIGURE 86

Aménagement hydraulique du bassin de Bourg-Dun (France)

ASPECTS HYDRAULIQUES DES ACTIONS

4 agriculteurs concernés A - B - C - D

1 - Mare 1987

2 - Fossé 1988

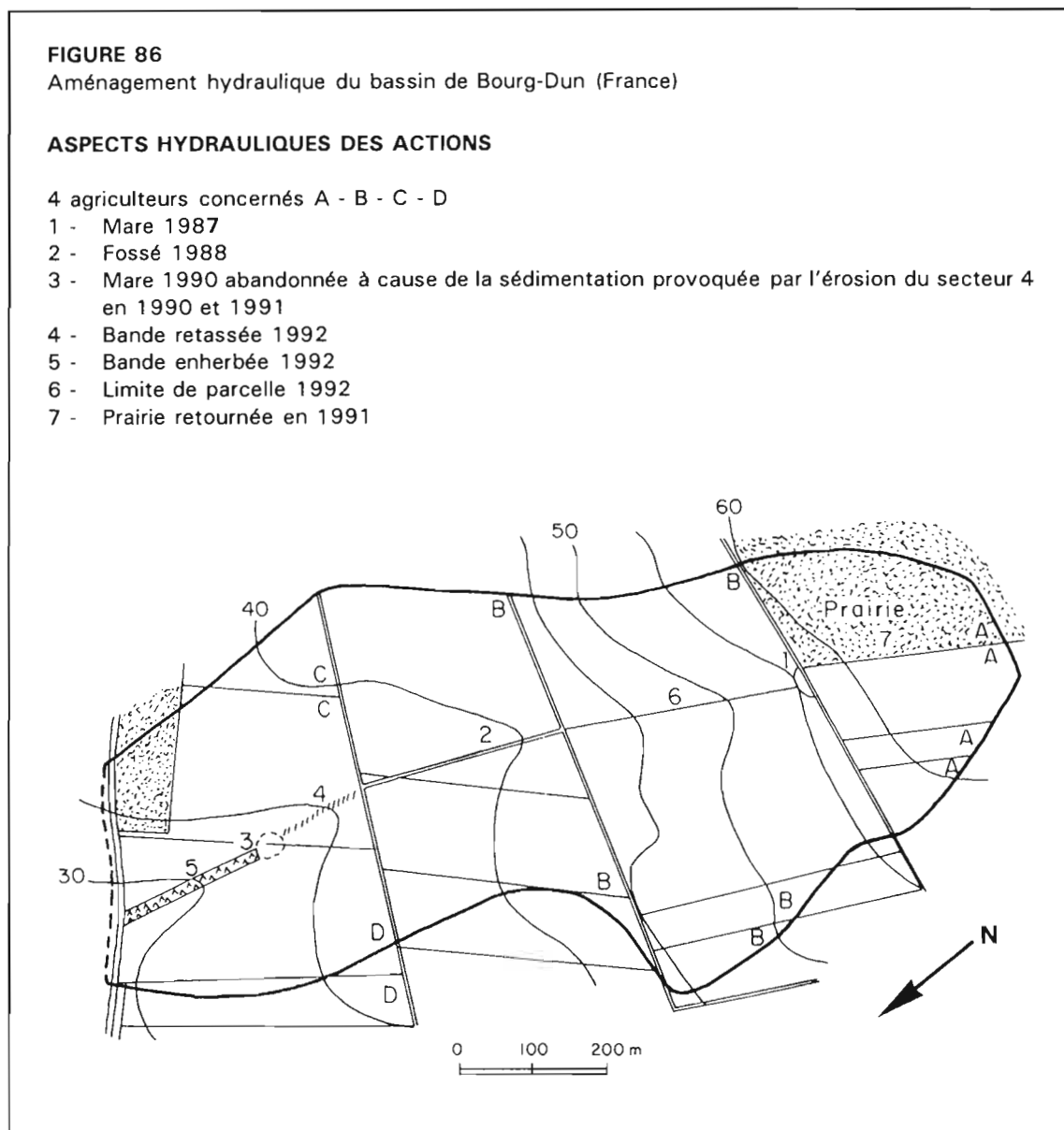
3 - Mare 1990 abandonnée à cause de la sédimentation provoquée par l'érosion du secteur 4 en 1990 et 1991

4 - Bande retassée 1992

5 - Bande enherbée 1992

6 - Limite de parcelle 1992

7 - Prairie retournée en 1991



Par exemple, toutes les traces de roues doivent être effacées car elles peuvent couvrir entre 5 et 33% de la surface du sol pour les betteraves et le maïs en fonction du type et de la marque du semoir et des équipements secondaires (tels que les effaceurs de traces). Sous culture, l'état de surface est déterminé au semis. Il faut donc constituer un lit de semence motteux (éviter de pulvériser ou de rouler la surface du sol), qui sera fonction du précédent cultural, des résidus, de l'humidité du sol. Les outils animés sont déconseillés par rapport aux outils à dents rigides ou vibrantes avec un nombre de passage limité à un, parfois deux (Ouvry, 1989/1990).

Pour les cultures à grand écartement, nous préconisons de ne réaliser l'affinement que sur la bande de semis, soit 1/3 de la surface, et de laisser l'inter-rang très motteux. Pour ces cultures, il est aussi préconisé de réaliser un désherbage mécanique ou binage de l'interrang

de façon à briser les croûtes de battance. Le choix du type de dent, rasette (déconseillé) ou pioche (conseillé) a beaucoup d'importance sur les risques d'érosion estivale.

En interculture, les marges de manoeuvre sont plus grandes. Sans entrer dans les détails, les solutions reposent sur les points suivants :

- il faut créer un état de surface motteux et chaotique de façon à profiter au maximum de la détention superficielle obtenue par le dernier travail du sol ;
- le travail du sol doit être perpendiculaire ou en oblique à la pente ; il peut être même partiel si les contraintes climatiques ou de temps sont très élevées ;
- il faut utiliser l'effet de mulch des pailles broyées ;
- on peut aussi planter des engrais verts (ou culture intermédiaire) à condition que leur densité et leur vitesse de croissance soient assez élevés pour protéger rapidement la surface du sol et préserver une infiltrabilité de l'ordre de 10 mm/h ; en outre, il faut que les incidences sur les cultures suivantes soient bien maîtrisées.

SUR LE PLAN HYDRAULIQUE

L'objectif est de réaliser des éléments de collecte des écoulements, alternés avec des éléments de stockage pour maîtriser les débits (Boiffin *et al.*, 1988; Ouvry, 1987-1992). Sur ce bassin versant, les agriculteurs ont réalisé progressivement des éléments du réseau comme l'illustre la figure 86 (Ouvry, 1987).

Certains aménagements sont définitifs, d'autres sont temporaires et à refaire après chaque travail du sol: bandes recompactées. Ces derniers offrent l'intérêt d'être très simples. Ils s'adaptent à des conditions très précises et limitées comme par exemple des pluies peu agressives. Cependant, ils démontrent aux agriculteurs trois points :

- il est possible d'agir,
- il faut traiter différemment les deux zones fonctionnelles,
- si cette solution est insuffisante, il faudra envisager une solution plus contraignante, du type fossé avec redécoupage du parcellaire ou bandes enherbées.

REMARQUES ET OBSTACLES RENCONTRES

Tout ce travail a nécessité beaucoup de temps. De plus, l'un des agriculteurs n'est pas motivé car ses parcelles situées en amont ne subissent aucun dommage. Ainsi pour que des pratiques visant à limiter le ruissellement soient généralisées, il faut nécessairement qu'elles soient intégrées aux conseils agronomiques diffusés par tous les prestataires de services agricoles.

Il arrive que les conseils agronomiques ne soient pas suivis, les raisons peuvent être diverses :

- manque de temps

- climat humide
- manque de matériel adapté
- surcoût des engrais verts
- effet secondaire des engrais verts.

Il faut donc poursuivre les recherches de solutions en tenant compte de ces contraintes.

COUT

Toute cette action de lutte a un coût qui se répartit en deux chapitres :

- L'animation régionale de la lutte par une personne entièrement vouée à cette tâche a un coût moyen annuel de l'ordre de 450 000 F.
- Le coût des solutions: les solutions recherchées ont un coût toujours le plus faible possible et en général nul, hormis le temps. Il s'agit d'utiliser au mieux les possibilités offertes par les équipements de l'exploitation.

Seuls les engrais verts ont un coût direct variable entre 100 et 300 FF/ha.

Les solutions hydrauliques ont des coûts très variables :

- bande retassée = 0 F
- raie de charrue en limite de parcelle sur l'axe du talweg = 0 F
- bande enherbée : enherbement = 3 F/m² (semence) et terrassement en entreprise = 30 F/m²
- fossé (section # 1m²) = 35 F/m²
- mare 100 à 500 m³ = 40 F/m³

Toutes les retenues plus importantes sont du ressort des collectivités locales en association avec les agriculteurs :

- prairie inondable (prairie située dans un fond de vallon et barrée par un talus compacté de hauteur supérieure ou égale à 1 m) et pouvant contenir 1000 à 10 000 m³, coût entre 30 et 60 F/m³ stocké.
- bassin de retenue classique entre 100 et 200 F/m³ soit un coût reporté à l'hectare de bassin versant compris entre 1 500 et 15 000 F/ha.

CONCLUSIONS

Etant donné l'importance du facteur état de surface des parcelles cultivées sur les risques de ruissellement et d'érosion, le rôle des agriculteurs est prépondérant. Cet état dépend de l'utilisation du sol, du système de culture, du travail du sol et du choix des outils.

La lutte préventive et curative contre ces phénomènes se fera donc avec les agriculteurs ou ne se fera pas.

C'est une action de longue haleine qui doit être poursuivie. Elle sera assurée par des agronomes pour initier les agriculteurs à intégrer définitivement dans leur itinéraire technique les éléments de la lutte contre les ruissellements et l'érosion.

En outre, des actions préventives doivent être conduites simultanément compte tenu des types d'érosion. Cela consiste dans la prévision et la création d'un réseau hydraulique lors du remembrement. Cette démarche se fait aujourd'hui en concertation avec les agriculteurs et les membres des Commissions Communales de Remembrement.

On peut aussi orienter les parcelles en ligne oblique par rapport aux pentes de façon à faire jouer au maximum la capacité de flacage sachant que l'économie de 1 à 2 mm de ruissellement obtenu par effet de rugosité représente 30 à 50% du total écoulé.

Toutefois, en dernier ressort, lorsque les ruissellements ne peuvent être totalement évités, la création d'ouvrages de retenues pour protéger le village reste nécessaire et complémentaire des actions agronomiques et hydrauliques étagées sur le bassin versant.

Cette action revêt bien un caractère d'intérêt général puisque l'érosion des terres sera limitée pour les agriculteurs; l'envasement des ouvrages sera réduit, la pollution des captages et des rivières régulièrement curées sera réduite. Les inondations seront aussi moins importantes et moins fréquentes dans les bourgs ruraux.

Ce type d'action, qui porte ses fruits à long terme, doit entrer dans le cadre d'une politique globale d'aménagement du territoire définie par les élus départementaux et régionaux.

PERSPECTIVES

LA GCES, UNE NOUVELLE PHILOSOPHIE

La lutte contre le ruissellement et l'érosion s'avère plus complexe que prévue. D'une part, les processus de dégradation des terres sont nombreux et le référentiel technique est loin d'être adapté à la diversité écologique du monde : on applique trop souvent des recettes sans connaître efficacité antiérosive, leur faisabilité, ni leur rentabilité. D'autre part, les implications sociologiques et économiques sont nombreuses et mal perçues : les problèmes fonciers et la sécurité des investissements, les objectifs et les priorités des paysans, la disponibilité en terre, en intrants et en main-d'oeuvre, les possibilités de valoriser les produits agricoles et d'améliorer le niveau de vie, la santé, etc...

La simple conservation des sols (CES) ne peut satisfaire la plupart des paysans car elle ne valorise pas immédiatement le travail supplémentaire qu'elle demande. La majorité des terres sont déjà si pauvres, si dégradées, que même si on maîtrise correctement les pertes par érosion, la productivité de la terre et du travail reste médiocre. Or, la population double tous les quinze à trente ans ! Le défi à relever est donc de doubler la production en dix ans pour rattraper la progression géométrique de la population. La conservation des sols ne suffit pas, il faut en restaurer la fertilité pour valoriser au plus tôt le travail investi... La GCES tente d'augmenter nettement les rendements tout en stabilisant le milieu.

Pour atteindre ce but, la GCES améliore la gestion des eaux, des matières organiques et des nutriments, pour créer des points d'intensification de la production et de développement du milieu rural par l'élevage (le fumier est l'une des clés de la productivité sur ces sols tropicaux à faible capacité de stockage de l'eau et des nutriments), par l'agroforesterie et les cultures hors saison. La GCES vise d'abord l'augmentation significative des rendements (ou mieux, des revenus nets) ce qui exige la stabilisation du milieu. La lutte antiérosive n'est plus le drapeau autour duquel on tente de rallier l'opinion publique... ce n'est qu'une partie d'un paquet technologique, un passage obligé.

On a cru pouvoir mobiliser les éléments fertilisants du sol par diverses voies biologiques : fumier, compost, paillage, haies vives, engrais verts. De nombreux exemples récents en pays tropicaux ont montré que sur les sols ferrallitiques acides, l'agroforesterie (et en particulier la culture entre des haies vives) permet de maîtriser l'érosion même sur de fortes pentes (25 à 60 %) et de ralentir la dégradation des sols cultivés. Mais, cette "jachère cultivée simultanée", de même que les engrais verts, immobilise 10 à 20 % des terres simplement pour maintenir un niveau de production médiocre, insuffisant pour faire face à la pression démographique. Pour sortir de cette impasse, il faut d'abord restaurer la fertilité des sols, ce qui n'est pas possible sans un apport massif de fumier (3 à 10 t/ha), de chaux (1 à 5 t/ha) et d'engrais minéraux, directement assimilables pour les cultures.

Les plus fortes populations rurales du monde vivent dans des jardins multiétagés où les interactions positives entre élevage-culture et arbres, sont poussées à l'extrême. En Afrique, il reste beaucoup à faire pour intensifier l'élevage et gérer les arbres pour réduire leur concurrence avec les cultures traditionnelles.

LA GCES, UNE STRATEGIE D'ACTION

Cet essai de synthèse des recherches sur les processus d'érosion et les méthodes de lutte antiérosive développées ces quarante dernières années, en particulier en Afrique francophone, nous ont amené à définir de nouveaux axes de recherche et de nouvelles orientations pour le développement rural.

DE NOUVEAUX AXES DE RECHERCHE

- Etude du fonctionnement, de la dynamique, des causes de déclin et des possibilités d'amélioration des stratégies traditionnelles de gestion de l'eau, des sols et de leur fertilité.
- Etude de la faisabilité, de l'acceptabilité, de l'efficacité et de la rentabilité des méthodes de lutte antiérosive.
- Etude du coût de l'érosion et de la lutte antiérosive à la parcelle et sur l'ensemble du bassin versant.
- Adaptation régionale des modes de gestion de l'eau, des nutriments et de la biomasse.
- Mise au point des méthodes de dissipation de l'énergie du ruissellement sur les pentes.
- Aspects socio-économiques de l'érosion et sensibilisation paysanne aux problèmes de dégradation de l'environnement.
- Dégradation et surtout, restauration de la productivité des terres : rôles de l'élevage, des arbres, des micro-organismes (fumier) et des compléments minéraux.
- Modélisation des risques de ruissellement, du drainage, de l'érosion, mais aussi optimisation de l'utilisation des terres en fonction des contraintes des systèmes de production et de la taille des exploitations.

DE NOUVELLES ORIENTATIONS POUR LE DEVELOPPEMENT RURAL

Puisque la participation paysanne est indispensable pour la pérennité des aménagements, il faut tenir compte des priorités paysannes et rechercher avec eux les moyens d'augmenter la productivité des terres et de valoriser le travail. La lutte antiérosive ne doit plus être présentée comme l'objectif prioritaire, mais comme une partie d'un paquet technologique visant à améliorer à la fois la gestion de l'eau, de la biomasse et des nutriments:

- Améliorer progressivement les techniques existantes en évitant d'augmenter les dépendances d'apports extérieurs au village (intrants, technologies ...).
- Intégrer de nouveaux éléments dans les systèmes de culture (agroforesterie, cultures associées, jachères dérobées de légumineuses, rotations accélérées, irrigation et fumure d'appoint).

- Promouvoir les structures antiérosives les moins coûteuses et les plus productives possibles.
- Prendre en compte les études du marché et l'état du réseau routier pour valoriser les productions.
- Mettre au point des techniques de drainage des routes et des versants sur lesquels elles s'appuient.
- Adapter la lutte antiérosive au régime foncier.

Les perspectives esquissées dans ce volume en matière de recherche et de développement rural appellent les différents acteurs à travailler de concert. Ces actions se conçoivent dans un cadre de coopération étroite entre institutions nationales, ONG, agences de développement et utilisateurs de la terre. Le rôle des institutions nationales doit notamment évoluer de celui d'exécutant à celui de promoteur. Le programme idéal met en scène les utilisateurs de la terre, pour planifier et mettre en oeuvre leurs propres solutions. A cet effet, les institutions nationales doivent être tenues pour responsables de la prise de conscience en matière de dégradation des terres, et les utilisateurs de la terre doivent être aidés dans l'émergence de leurs propres organisations.

Bibliographie

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

- Arabi M. et Roose E. 1989. Influence de quatre systèmes de production en région méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bull. Réseau Erosion*, ORSTOM, Montpellier 9 : 39-51.
- Bolline A. 1982. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse Dr Géographie Univ. Liège, 356 p.
- Bennet H.H. 1939. *Elements of Soil Conservation*. 2nd edition. Mac Graw-Hill, New York.
- Boli Z., Bep A. et Roose E. 1991. Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 127-138.
- Bourges J., Floret C., Girard G. et Pontanier R. 1979. *Etude d'un milieu représentatif du Sud Tunisien type SEGUI : la citerne TELMAN, Campagnes 1972-77*. Min. Agriculture/ORSTOM Tunis, 87 p.
- Buchy M. 1989. L'arbre dans l'économie rurale des collines de la moyenne région du delta du Fleuve Rouge. Exemple de la coopérative de Chan Mong. *Rapport de stage CNEARC-ENGREF*, Montpellier, 60 p.
- Campbell I.A. 1983. The partial area contribution concept and its application to the problem of sediment source areas. In: *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaify et Moldenhauer (eds.), Soil Cons. Soc. America, Ankeny, USA, pp 128-138.
- Cosandey C. 1983. *Recherches sur le bilan de l'eau dans l'Ouest du Massif Armoricaïn*. Thèse Doct. Etat, Paris, Institut Géographie, 515 p.
- Dupriez H. et De Leener Ph. 1990. *Les chemins de l'eau : ruissellement, irrigation, drainage*. Terres et Vie (eds.). Nivelles (Belgique). 380 p.
- Eggl A. 1985. La conservation des sols à l'aide des méthodes agroforestières : le cas du Rwanda. *Bull. Recherche Agron. de Gembloux Belgique* 20(4) : 561-587.
- Ellison W.D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* 25 : 131-181.
- Garrigue N. 1990. La place de l'arbre dans le paysage agricole : Etude des "jardins boisés" dans le bassin versant de Petite Rivière de Nippes, Haïti. *Mémoire CNEARC*, Montpellier, 125 p.
- Heusch B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental, Maroc. *Annales Rech. Forestières au Maroc* 12 : 9-176.

- Heusch B. 1988. *Aménagement d'un terroir. Techniques de lutte contre l'érosion*. CNEARC, Montpellier, France, 199 p.
- Hudson N.W. 1973. *Soil Conservation*. Batsford, London, 320 p.
- Hudson N.W. 1992. *Land Husbandry*. Batsford, London, 192 p.
- Inades. 1989. *Formation en Agriculture au Rwanda, Kigali*, 32 p.
- Kang B.T., Wilson G.F. et Lawson T.L. 1984. *Alley Cropping : A Stable Alternative to Shifting Cultivation*. IITA, Ibadan-Nigeria: 22 p.
- Leneuf N. 1959. *L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière : les sols qui en sont dérivés*. Thèse Fac. Sci. Paris, 210 p.
- Lowdermilk W.C. 1953. Conquest of the land through 7 000 years. *Agriculture Information Bull.* 99. USDA, SCS.
- Mannering J.V. 1981. The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. In: *ISCO 2*, Morgan (ed.), Wiley: p. 337-350.
- Naegel Ph. 1991. Une stratégie de développement rural : la GCES. Une étude de cas à la Vallée de Jacmel Haïti. *Mémoire CNEARC*, 93 p. + annexes.
- Olivry C. et Hoorelbeck J. 1989. Erodibilité des terres noires marneuses de la vallée du Büech, France. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25, 11 : 95-110.
- Pieri C. 1989. *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara*. Min. Coop. et Dév., CIRAD Paris, 444 p.
- Peltier R. 1989. *Un essai sylvo-pastoral au Nord Cameroun*. MESIRES Maroua (Cameroun), CTFT Nogent (France) 41 p.
- Rimwanich. 1988. Land conservation for future generations. *Proc. ISCO - 5th*. Bangkok, Thailand, 667 p.
- Roose E. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agon. Trop.* 22(2) : 123-152.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. ORSTOM Abidjan, 125 p. Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20.
- Roose E. 1975. Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas. In: *Soil Conditioners*. SSSA Special publication 7(12) : 131-137.
- Roose E. 1977. Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en parcelles expérimentales. *Travaux et Doc.* ORSTOM Paris n° 78, 108 p.
- Roose E. 1979. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du Nord Côte d'Ivoire. Korhogo, campagnes 1967-1975. In : *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 17(2) : 81-118.

- 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 Doct. ès Sciences, Université d'Orléans, 587 p. In : *Travaux et Documents* de l'ORSTOM, Paris, n° 130, 569 p.
- Roose E., Dugue P. et Rodriguez L. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 233.
- Shaxson T.F., Hudson N.W., Sanders D.W., Roose E. et Moldenhauer W.C. 1989. *Land Husbandry: A Framework for Soil and Water Conservation*. Soil and Water Cons. Soc., WASWC, Ankeny, Iowa, USA, 64 p.
- Stallings J.H. 1953. Continuous plant cover : the key to soil and water conservation. *J. Soil and Water Cons.* 8: 63-68.
- Stallings J.H. 1957. *Soil Conservation*. Prentice Hall, New York, 575 p.
- Stocking M. 1978. A dilemma for soil conservation. *AREA* 10 : 306-308.
- Tondeur G. 1950. *Erosion du sol, spécialement au Congo Belge*. Publ. Min. Colonies, Bruxelles 2e éd., 240 p.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion. A guide to conservation planning. USDA-ARS, *Agriculture Handbook* n° 537, 58 p.
- Young A. 1986. The potential of agroforestry for soil conservation. Part 1. Erosion Control. *Working Paper* n° 42 - ICRAF, Nairobi, Kenya.
- Young A. 1989. *Agroforestry for Soil Conservation Science and Practice of Agroforestry*. ICRAF-CAB Internat., Wallingford, UK, 275 p.

CHAPITRE 2 : EVOLUTION DE LA LAE

- Balasubramanian V. et Sekayange L. 1992. Effets de la culture en couloir sur les propriétés du sol et les performances des arbustes et des cultures vivrières dans un environnement semi-aride du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 180-190.
- Bennett H. 1939. *Elements of Soil Conservation*. Mac Graw-Hill, New York.
- Boyer J. 1970. *Essais de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone*. ORSTOM, Paris, 175 p.
- Chaminade R. 1965. Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols tropicaux. Principes de base et technique des vases de culture. *L'Agron. Trop.* 20(10) : 1014-1017.
- Chase R.G. et Boudouresque E. 1989. A study of methods for revegetation of barren crusted sahelian forest soils. *Proc. Symposium "Soil, crop and water management in the sudano-sahelian zone"*. INRAN-ICRISAT Niamey, Niger, 385 p.: pp. 125-136.
- Chopart J.C. 1980. *Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal*. Thèse Doct. Inst. Nat. Polytechnique Toulouse, France, 160 p. + annexes.

- Critchley W., Reij C. et Seznec A. 1992. Water harvesting for plant production. Part II. Case studies and conclusions for Sub-Sahara Africa. *World Bank Techn. Paper*, 120 p.
- Dixon R.M. 1983. Land imprinting for controlling infiltration and desertification processus. *ASAE paper*, 83-2514.
- Fotsing J.M. 1992. Stratégies paysannes de gestion de terroirs et de LAE en pays Bamiléké Ouest Cameroun). *Bull. Réseau Erosion* 12 : 241-254.
- Godefroy J., Roose E. et Muller M. 1970. Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits* 30(4) : 223-235.
- Godefroy J., Roose E. et Muller M. 1975. Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits* 25(6) : 403-420.
- Gréco J. 1979. *La défense des sols contre l'érosion*. La Maison Rustique, Paris, 183 p.
- Harroy J.P. 1944. *Afrique, terre qui meurt*. Bruxelles, Académie Royale de Belgique, 557 p.
- Heusch B. 1986. Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2) : 153-162.
- Hudson N.W. 1992. *Land Husbandry*. Batsford, London, 192 p.
- Hijkoop J. Poel P. van der et Kaya B. 1991. *Aménagement antiérosif et gestion de terroir : une lutte de longue haleine*. IER Bamako + KIT Amsterdam, 154 p.
- König D. 1992. L'agriculture écologique agroforestière. Une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 130-139.
- Lefay O. 1986. Etude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. *Rapport de stage CNEARC-ORSTOM-INRF*, Montpellier. 50 p. + ann.
- Lilin Ch. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2) : 139-146.
- Lovejoy J.B. et Napier T. 1986. Conserving soil: sociological insights. *J. Soil and Water Conservation* 41(5) : 304-310.
- Lowdermilk W.C. 1953. Conquest of the land through 7 000 years. *Agric. Information Bull.* 99. USDA, SCS.
- Marchal J.Y. 1979. L'espace des techniciens et celui des paysans. "Maîtrise de l'espace agraire et développement". *Mémoire ORSTOM*, Paris, n° 89 : 245-252.
- Monjauze A. 1962. *Rénovation rurale : rôle et dispositifs d'infiltration*. Délégation Générale, Dept. Forêts, Service DRS, Alger, 16 p.
- Morel R. et Quantin P. 1972. Observation sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (Rép. Centrafricaine). *Agron. Trop.* 27(6) : 667-739.

- Ndayizigiyé F. 1992. Valorisation des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) dans la lutte contre l'érosion au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 120-129.
- Pieri Ch. et Moreau R. 1987. *Soil fertility and fertilization of tropical crops. The experience of CIRAD and ORSTOM*. Montpellier. World Bank-ORSTOM-CIRAD Seminar, pp. 67-92.
- Pieri Ch. 1989. *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara*. Min. Coop. et Dév. et CIRAD, Paris, 444 p.
- Plantié L. 1961. *Technique franco-algérienne des banquettes de DRS*. Délégation Générale, Dept. Forêts, Service DRS d'Oran, 22 p.
- Poel P. Van der. 1988. *La production et la conservation du fumier organique. Rapport sur les essais 1988 au Mali*. IER/DRA/KIT. Bamako/Amsterdam.
- Poel P. Van der et Kaya B. 1989. *Comparaison des méthodes de régénération des endroits dégradés sur la berge du marigot à Kaniko*. DRSPR/V-FSB, Sikasso.
- Putod R. 1956. La protection des vignes contre l'érosion. *Revue Agronomie d'Afrique du Nord* 1992 : 567-576.
- Quantin P. 1992. *Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole*. ORSTOM Paris CEE Bruxelles, Contrat TS2A-212 C : 85 p.
- Reij Ch., Mulder P. et Begeman L. 1988. Water harvesting for plant production. *World Bank Technical Paper* n° 91, 123 p.
- Rochette R. et al. 1989. *Le Sahel en lutte contre la désertification. Leçons d'expériences*. Cilss/PAC, MARGRAF, 592 p.
- Roose E. 1987. *Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano sahéliens d'Afrique occidentale*. C.R. Séminaire ICRISAT/INRAN, Niamey, Niger, p. 57-72.
- Roose E. 1988. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et de la fertilité des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale. In : *L'aridité, contrainte au développement*. ORSTOM Montpellier, Série Didactique : 481-506.
- Roose E. 1988. Soil and water conservation lessons from steep slopes farming in French speaking countries of Africa. In : *Conservation Farming on Steep Lands*. Moldenhauer W.C. and Hudson N.W. (eds.) Soil and Water Conservation Society, Ankeny, USA, pp. 129-139.
- Roose E. 1992. Contraintes et espoirs de développement d'une agriculture durable en montagne tropicale. *Bull. Réseau Erosion* n° 12 : 57-70.
- Roose E. 1992. Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano sahélienne d'Afrique occidentale. C. *Rendu Séminaire sur la Jachère*, ORSTOM, Montpellier.
- Roose E. et Godefroy J. 1977. Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée irriguée de Basse Côte d'Ivoire : Azaguié, 1966-73. *Cah. ORSTOM Pédol.* 15(4) : 409-436.

- Roose E. et Rodriguez L. 1990. *Aménagement de terroir au Yatenga. Quatre années de GCES : bilan et perspectives*. ORSTOM Montpellier, 40 p.
- Roose E., Ndayizigiye F., Sekayange L. et Nsengimana J. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement rural au Rwanda. *Bulletin Réseau Erosion* n° 12 : 140-160.
- Roose E., Dugue P. et Rodriguez L. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone Soudano Sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques* 233(3) : 49-63.
- Roose E., Ndayizigiye F. et Sekayange L. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement rural au Rwanda. *Cah. ORSTOM Pédol.* 26. Spécial érosion, sous presse.
- Shaxson T.F., Hudson N.W., Sanders D.W., Roose E., et Moldenhauer W.C. 1988. *Land Husbandry. A Framework for Soil and Water Conservation*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA, 64 p.
- Stocking M. 1992. La dégradation et la réhabilitation des terres : rétrospective et prospective de la recherche en Afrique : 198-90. *IIED, Programme Réseaux des Zones Arides, dossier* n° 34, Montpellier. 26 p.
- Temple P. et Rapp A. 1972. Landslides in the MGETA area, Western Uluguru mountains Tanzania. In : *Studies of Soil erosion and Sedimentation in Tanzania*. Rapp, Berry et Temple (eds.), Geografiska Annales, 54(3) : 157-194.
- Wischmeier W.H., Jonhson C.B. et Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sties. *J. Soil and Water Conservation* 26(5): 189-192.

CHAPITRE 3 : ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES

- Alaoui O. 1992. *Analyse économique de la lutte antiérosive : cas du bassin du Loukkos Maroc*. AGROCONCEPT, Séminaire sur le Programme National de la recherche sur l'aménagement des bassins versants. Rabat, 14 p.
- Alaoui O. 1992. *Analyse économique et recherche appliquée à la lutte antiérosive. Quelles priorités ?* Atelier national pour la définition d'un programme de recherche appliquée en aménagement intégré des bassins versants. Rabat, Maroc, avril 1992. Agro-concept, 19 pages.
- Biot Y. 1988. Modelling productivity losses caused by erosion. In: *Proceedings of ISCO 5*. Rimwanich (ed.), Min. of Agriculture, Bangkok, Thailand. pp. 177-196.
- Biot Y. 1990. THEPROM, an erosion-productivity model. In : *Soil Erosion on Agricultural Land*. Boardman J., Foster I.D. et Dearing J.A. (eds). John Wiley. pp. 465-479.
- CIFT. 1969. Conservation des sols au Sud du Sahara. Min. Affaires Etrangères et CTFT, Paris, *Collection techniques rurales en Afrique* n° 12.
- Claude J., Francillon G. et Loyer J.Y. 1976. *Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de mars 1973*. DRES-ORSTOM, 162 p. + photos + Annexes.

- Claude J. et Chartier R. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie : campagne 1975. *AISH* n° 122 : 219-252.
- Combeau A. 1977. *Erosion et Conservation des Sols*. ORSTOM, Paris, 85 p.
- Critchley W., Reij C. et Seznec A. 1992. Water harvesting for plant production. Part 2. Case studies and conclusions for sub-Saharan Africa. *World Bank Technical Paper*, 120 p.
- Davy L. 1989. Une catastrophe naturelle : l'averse mémorable du 3/10/88 et ses conséquences hydrologiques. *Hydrologie Continentale* 4(2) : 75-92.
- Demmak A. 1982. *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale*. Thèse Doct. Ing., Paris, 323 p.
- Demmak A. 1984. Recherche d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques et les paramètres climatiques des bassins : cas algérien. *Publication AISH* n° 144 : 403-414.
- De Ploey J. 1990. La conservation des sols. *La Recherche* 227, Suppl. 6 : 111-122.
- Dregne H.E. 1988. *Erosion, Productivity and Sustainable Agriculture*. Int. Center for Arid and Semiarid land studies, Texas Techn. Univ. Lubbock, Texas, 11 p.
- El-Swaify S.A., Dangler E.W. et Armstrong C.L. 1982. Soil erosion by water in the tropics. Hitahr, Univ. Hawaii, *Research Extension Série* n° 24, 173 p.
- Elwell H.A. et Stocking M.A. 1984. Estimating soil life-span for conservation planning. *Tropical Agriculture* 61(2): 148-150.
- Evans R. 1981. Assessments of soil erosion and peat wastage for parts of East Anglia, England. In: *Soil Conservation: Problems and Prospects*. Morgan R.P.C. (ed.). John Wiley. pp. 521-530.
- Fournier F. 1960. *Climat et érosion*. Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
- Goujon P. 1972. Essai de défense contre l'érosion des hauts plateaux malgaches. L'aménagement de Manankazo. In : *C.R. Commission Internationale de Génie Rural*, Firenze : 12-16 sept. 1972. 16 p.
- Hamza A. 1992. Quantification des pertes en terre du territoire tunisien. *Bull. Réseau Erosion* 13 : 188-192.
- Hénin S. et Gobillot T. 1950. L'érosion en France. *C.R. Acad. Sci. Paris* 230 1 : 128-130.
- Hénin S. et Gobillot T. 1950. L'érosion en France. *Bull. Techn. Min. Agric. Paris* 50 : 9-11.
- Heusch B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental Maroc. *Annales Rech. Forestière au Maroc* n° 12 : 9-176.
- Heusch B. 1982. Etude de l'Erosion et des Transports Solides en Zone Semi-aride. *Rech. Biblio sur l'Afrique du Nord*. Projet PNUD Rab/80/04 : 83 p.
- Hudson N.W. 1991. A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin* 64, Rome, 65 p.

- Hurni H. 1986. *Soil Conservation in Ethiopia: Guidelines for Development Agents*. Ministry of Agriculture, CFSCDD, Ethiopie, 100 p.
- ISRIC. *Carte mondiale de dégradation des sols*.
- Kanwar J.S. 1982. *Managing soil resources to meet the challenge to mankind*. Presidential address of 12th Int. Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February 1982. Plenary Session paper, pp. 1-32.
- Kouti A., Taabni M. et Tihay J. 1991. Gestion des barrages collinaires dans le Tell Oranais Algérie. *Bull. Réseau Erosion* n° 11 : 157-163.
- Lal R. 1976. Soil erosion problems on an Alfisol in Western Nigeria and their control. *Monograph n° 1*, Ibadan, Nigeria, IITA.
- Lal R. 1983. Soil erosion and its relation to productivity in tropical soils. In : *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaify, Moldenhauer et Lô (eds). Soil Cons. Soc. of Am., Ankeny Iowa, USA. pp 237-247.
- Larson W.E., Pierce F.J. et Dowdy R.H. 1983. Loss in long-term productivity from soil erosion in the United States. In : *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaify, Moldenhauer et Lô (eds.) Soil Cons. Soc. Am., Ankeny, USA: 262-271.
- Lovejoy J.B. et Napier T. 1986. Conserving soils: sociological insights. *J. Soil and Water Conservation* 415: 304-310.
- Naegel Ph. 1991. Une stratégie de développement rural : la gestion conservatoire de l'eau de la biomasse et de la fertilité du sol. Etude du cas de la Vallée de Jacmel Haïti. *Mémoire CNEARC*, Montpellier, 105 p.
- Neboit R. 1991. *L'homme et l'érosion dans le monde*. Fac. Lettres Univ. Clermont-Ferrand, France, 2e édition, 269 p.
- Nicou R., Ouattara B. et Some L. 1987. *Effet des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières au Burkina-Faso*. INERA, Ouagadougou, 77 p.
- Reij C., Mulder P. et Begeman C. 1988. Water harvesting for plant production. *World Bank Techn. Paper* n° 91, 123 p.
- Roose E. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruillement au Sénégal. *Agron. Trop.* 22(2) : 123-152.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruillement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire*. Thèse Doct. Ing. n° 20, Abidjan, ORSTOM : 125 p.
- Roose E. 1977. Erosion et ruillement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en petites parcelles. *Travaux et Doc. ORSTOM, Paris* n° 78, 108 p.

- Roose E. 1980. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct. es Sciences, Université Orléans. In : *Travaux et Documents ORSTOM, Paris*, n° 130, 569 p.
- Roose E. 1982. *Influences potentielles des aménagements antiérosifs des collines dans le projet de protection contre les inondations de la plaine de Antananarivo Madagascar*. Rapport de mission 21/4 au 14/5/82. ORSTOM Montpellier, 38 p.
- Roose E. 1990. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale. In : *Aridité, contrainte au développement*. ORSTOM Paris, Collection Didactique, pp 481-506.
- Roose E. 1991. Conservation des sols en zone méditerranéenne. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES. *Cah. ORSTOM Pédol.* 26 2 : 145-181.
- Roose E. 1992. Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano sahélienne d'Afrique occidentale. *C. Rendu Séminaire sur la Jachère*, ORSTOM Montpellier, 11 p.
- Roose E. et Piot J. 1984. Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau Central Burkina Faso, Symposium Harare, Zimbabwe, *AISH Publication* n° 144: 485-498.
- Roose E., Fauck R. et Pedro G., 1981. Modifications fondamentales de la dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale sous l'influence de la mise en culture. *C.R. Académie Sciences Paris*, tome 292, sér. 11 : 1457-1460.
- Roose E., Lelong F. et Colombani J. 1983. Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'Ouest. *J. Sciences Hydrologiques* 28 2 : 283-309.
- Roose E., Dugue P. et Rodriguez L. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terrasses en zone Soudano Sahélienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques* n° 233 : 49-63.
- Rutunga V. 1992. *Synthèse des connaissances sur la fertilité des terres et la fertilisation des cultures au Rwanda 1960-90*. Minagri, Projet PNUC/FAO, Kigali, 122 p.
- Sanders D.W. 1988. Soils and water conservation on steep lands: a summary of Puerto Rico workshop discussions. pp. 275-282. In : *Conservation Farming on Steep Lands*. Moldenhauer W.C. et Hudson N.W. (eds.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA, 296 p.
- Schwing J.F. 1979. Evaluation du poids économique de l'érosion dans le vignoble alsacien. In : *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré*. Strasbourg C.R. publiés par H. et T. Vogt, CEREG, Strasbourg, 275 p. : 175-182.
- Seznec A. 1992. Réflexions sur le projet de développement de la montagne marocaine. Note de synthèse du Séminaire d'Azilal CCCD. *Bull. Réseau Erosion* n° 12 : 358-364.
- Some L. 1989. *Diagnostic agro-pédo-climatique du risque de sécheresse au Burkina-Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, mil et maïs*. Thèse USTL Montpellier, Spécialité physiologie-agronomie : 320 p.

- Stocking M.A. 1984. *Erosion and Soil Productivity: A Review*. Consultants' working paper n° 1. Soil Conservation Programme, FAO/AGLS, Rome. 102 p.
- Stocking M.A. 1986. *The Cost of Soil Erosion in Zimbabwe in terms of Three Major Nutrients*. Consultants' working paper n° 3, Soil Conservation Programme, FAO/AGLS, Rome.
- Stocking M.A. 1987. Quantifying the on-site impact of soil erosion in land conservation for future generation, *ISCO 5 Bangkok*, S. Rimwanich (ed.), Ministry of Agriculture, Dept. of Land Management, Bangkok, Thailand. pp. 137-162.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union* 39: 285-291.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Handbook* n° 537, 58 p.
- Young K.K. 1980. The impact of erosion on the productivity of soils in the United States. In : *Assessment of Erosion*. De Boodt et Gabriels (eds.). John Wiley. pp. 295-304.

CHAPITRE 4 : EROSION MECANIQUE SECHE

- De Noni G. et Viennot M. 1991. L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur. *Bull. Réseau Erosion* n° 11 : 205-209.
- Nyamulinda V. 1989. Méthodes autochtones de conservation des sols en préfecture de Ruhengeri. *Bull. Agric. Rwanda* 3 : 147-158.
- Revel J.C. Coste N., Cavalié J. et Costes J.L. 1989. Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain France. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 111-118.
- Roose E. et 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. 1986. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables ? *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2) : 197-208.
- Roose E. et Cavalié J. 1986. New strategy of water management and soil conservation. In : *Proceedings ISCO 5 Bangkok*. Rimwanich (ed.). pp. 913-924.
- Roose E. 1990. *Un programme national de Gestion Conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols au Burundi*. Min. Aménagement Burundi-ORSTOM Montpellier, 32 p.
- Roose E. 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de LAE : la GCES. *Cah. ORSTOM Pédol.* 26(2) : 145-181.
- Wassmer P. 1981. *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion dans la préfecture de Kibuye*. Thèse 3e cycle Univ. Strasbourg, 156 p.

CHAPITRE 5 : EROSION EN NAPPE

- Arabi M. 1991. *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen Médéa, Algérie*. Thèse géographie, Univ. Grenoble, 272 p.
- Arnoldus H. 1981. An approximation of the rainfall factor in the USLE. In : *Assessment of Erosion*. de Boodt et Gabriels (eds.). John Wiley. pp. 127-132.
- Boli Z., Bep A. et Roose E. 1991. Enquête sur l'érosion en zone cotonnière du Nord Cameroun. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 127-138.
- Bolline A. 1982. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux en moyenne Belgique*. Thèse Doct. Géogr. Univ. Lièges, 356 p.
- Brunet-Moret Y. 1963. *Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Haute Volta*. Edité par CIEH, ORSTOM Paris, 23 p. + annexes.
- Brunet-Moret Y. 1967. *Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Côte d'Ivoire*. Edité par CIEH, ORSTOM Paris, 20 p. + annexes.
- Bryan R.B. 1981. Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions. In : *Proc. IAMS* 135: 391-403.
- Casenave A. et Valentin C. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Edit. ORSTOM Paris, 229 p.
- Charreau Cl. 1970. *Pluie et érosion*. IRAT, Bambey, Sénégal, séminaire climatologie : 12 p.
- Christoi R. 1961. *Résultats obtenus à l'essai "EROSION" de la station de Niangoloko Haute-Volta*. IRHO, 51 pages.
- Delwaille J.C. 1973. Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. *Bois et Forêts des Tropiques* 150: 15-37.
- Ellison W.D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* 25: 131-181.
- Elwell H.A. 1981. A soil loss estimation technique for southern Africa SLEMSA. In : *Soil Conservation Problems and Prospects*. Morgan (ed.). John Wiley, Chichester. pp. 281-292.
- Elwell H.A. et Stocking M.A. 1973. Rainfall parameters for soil loss estimation in a subtropical climate. *J. Agric. Eng. Res.* 18: 169-177.
- Elwell H.A. et Stocking M.A. 1975. Parameters for estimating annual runoff and soil loss from agricultural land in Rhodesia. *Water Resources Research* 11(4) : 601-605.
- Fournier F. 1960. *Climat et érosion*. Thèse de Géographie. Presses Univ. de France, Paris : 201 p.
- Galabert J. et Millogo E. 1973. *Rapport de synthèse 1972. Erosivité des pluies au Burkina Faso*. CTFT/Min. Agriculture, Ouagadougou Burkina, 46 p.
- Hénin S. et Monnier G. 1956. *Evaluation de la stabilité structurale du sol*. CRAISS, Paris, volume B : 49-52.

- Heusch B. 1970. L'érosion du Pré Rif. *Annales Rech. Forestière Maroc. Rabat*, Spécial n° 12 : 9-176.
- Hudson N.W. 1963. *Rainfall intensity and erosivity*. Advisory notes, Dept. of Conservation, Rhodesia, 5 p.
- Hudson N.W. 1965. *The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion*. MSc Thesis, University of Capetown.
- Hudson N.W. 1983. *Soil Conservation*. Batsford. 324 p.
- Kalman R. 1967. *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou Maroc*. Projet Sebou, 32 p.
- Lafforgue A. 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 14(4) : 299-344.
- Lal R. 1976. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control. *IITA Monograph 1*, 208 pp.
- Laws J.O. et Parson D.A. 1943. The relation of rain drop size to intensity. *Trans. Amer. Geophys. Union* 709-721.
- Masson J.M. 1971. *L'érosion par l'eau en climat méditerranéen*. Thèse Doct. Ing. USTL Montpellier, 213 p.
- McCalla T.M. 1944. Waterdrop method of determining stability of soil structure. *Soil Sci.* 58 : 117-123.
- Middelton H.E. 1930. Properties of soils which influence erosion. *USDA Techn. Bull.* 178: 16 p.
- Pihan J. 1979. Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. In : *Colloque Strasbourg*. T. et J. Vogt (eds.), pp. 13-18.
- Poesen J. 1987. Transport of rock fragments by rill flow. A field study. *Catena*, suppl. 8 : 35-54.
- Quantin P. et Combeau A. 1962. Erosion et stabilité structurale du sol. *AISH* n° 59: 124-130.
- Raheliarisoa M.A. 1986. *Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux sous pluies simulées*. Thèse Univ. Orléans, ORSTOM-INRA, 300 p.
- Renard K.G., Foster G., Weesics G.A. et Porter J.P. 1991. Revised universal soil loss equation RUSLE. *USLE-EPIC-RUSLE-Wepp Bull.* 1 : 30-33.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesure de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*. Thèse Doct. Ing. Fac. sci. Abidjan n° 20, ORSTOM : 125 p.
- Roose E. 1976. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in west Africa. In: *Soil Erosion: Prediction and Control*. SCSA, special publication n° 21: 60-74.

- Roose E. 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles. ORSTOM Paris, *Travaux et doc.* n° 78, 105 p.
- Stocking M.A. et Elwell H.A. 1974. Rainfall erosivity over Rhodesia. *The Inst. British Geographers Trans. New Series* 1(2) : 231-245.
- Valentin C. 1979. Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. In : *Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré*. H. et T. Vogt (eds.). INRA Colmar. Univ. Strasbourg. pp. 117-122.
- Williams J.R. 1975. Sediment yield prediction with USLE using runoff energy factor. In : *ARS-S-40*. Agr. Res. Serv., USDA. Washington DC. pp. 244-252.
- Williams J.R. 1982. The physical components of the EPIC model. In : *Soil Erosion and Conservation*. ISCO 3. El-Swaify, Moldenhauer and Co (eds.). SWC. Sol of America, Ankeny, USA. pp. 273-284.
- Wischmeier W.H. 1959. A rainfall erosivity index for a universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23: 246-249.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1960. A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. *Proc. 7th Inter. Congress Soil Science Soc.* Vol. 1 : 418-425.
- Zingg A.W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. *Agric. Eng.* 21: 59-64.

Erodibilité

- Collinet J. et Valentin C. 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 17 4 : 283-328.
- Collinet J. et Valentin C. 1984. Evaluation of erosion factors in Western Africa using rainfall simulation. *Proc. Symp. Harare AISH* 144: 451-461.
- De Ploey J. 1971. Liquefaction and rainwash erosion. *Zeitschr. Geomorph.* 15: 491-496.
- Delhoume J.P. Asseline J., Ruiz Valdes J. et Viramonte D. 1989. *Caractérisation hydrodynamique au moyen d'un infiltromètre à aspersion de sols représentatifs du Nord aride du Mexique*. Projet MAPIMI, Inst. Ecologia de Mexico et ORSTOM, Paris, à paraître.
- Dumas J. 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM Pédol.* 3(4) : 307-333.
- Gril J.J. 1982. *L'érosion dans le vignoble du Beaujolais. Etude comparative des techniques culturales sur la commune de Pommiers*. Cemagref Lyon, DDA, Chambre Agriculture : 28 p. + 5 ann. Cemagref B.I., 317, juin 1984 : 47-52.
- Hjulström F. 1935. Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. *Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsala* 25 : 293-305 et 442-452.
- Le Bissonnais Y. 1988. *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous la pluie*. Thèse Université Orléans/INRA : 220 p.

- Lelong F., Roose E. et Darthout R. 1992. *Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de différents types texturaux de sols cultivés ou non du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées*. Univ. Orléans, ORSTOM, INRA : 15 p.
- Masson F.X. 1992. *Gestion des sols de la région du Nord France. Relation Sols et formations superficielles. Proposition d'une démarche générale*. Doct. es Sciences Naturelles. Thèse UST Lille : 513 p.
- Moldenhauer W.C., Lovely W.G., Swanson N.P. et Currence H.D. 1971. Effect of row grades and tillage systems on soil and water losses. *J. Soil and Water Cons.* 26 5: 193-195.
- Ngo-Chang-Bang. 1967. Méthode et appareil pour l'étude dynamique de la structure des sols. In : *Colloque "Fertilité des sols tropicaux"*. Tananarive, tome 1. CIRAD, Montpellier. pp. 51-68.
- Pontanier R., Moukouri Kuoh H., Sayol R., Seiny-Boukar L. et Thebe B. 1984. *Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord Cameroun*. ORSTOM-IRA, Yaoundé, 76 p.
- Roose E. 1980. Approach to the definition of rain erosivity and soil erodibility in West Africa. In : *Assessment of Erosion*. De Boodt et Gabriels (eds.). John Wiley. pp. 153-164.
- Roose E. 1980. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. ORSTOM Paris, *Trav. et Doc.* 130 : 587 p.
- Roose E. 1992. *Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano sahélienne d'Afrique occidentale*. Comm. Atelier sur la jachère. ORSTOM/CNRS, Montpellier, 11 p. sous presse.
- Roose E. et Asseline J. 1978. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux parcelles d'érosion d'Adiopodoumé : II - Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. ORSTOM Pédol.* 16(1) : 43-72.
- Roose E. et Sarrailh J.M. 1989. Erodibility de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 7-30.
- Singer M.J., Blackard J. et Janitsky P. 1980. Dithionite iron and soil cation content as factors in soil erodibility. In : *Assessment of Erosion*. De Boodt et Gabriels (eds.). John Wiley. pp. 259-268.
- Swanson N.P. et Dedrick A.R. 1965. *Protecting soil surface against water erosion with organic mulches*. Meeting of Amer. Soc. Agr. Eng. Columbus, Ohio, 10 p.
- Valentin C. et Janeau J.L. 1989. Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM Pédol.* 251 : 41-52.

Topographie

- Arabi M. et Roose E. 1989. Influence des systèmes de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 9 : 39-51.
- Avenard J.M. et Roose E.J. 1972. *Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire*. Comm. 22e Congrès Int. Géographie, Canada. ORSTOM Abidjan, 25 p.

- Birot Y., Galabert T., Roose E. et Arrivets J. 1968. *Deuxième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion de Gampéla : 1968*. CTFT-Ouagadougou, Burkina Faso, 40 p.
- Blancaneaux Ph. 1979. *Dynamique des sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique*. ORSTOM, Paris, 162 p.
- Charreau C. 1969. *Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance*. VII Congrès Int. Génie Rural CNRA, Bambey Sénégal, 13 p.
- Collinet J. 1971. *Premiers résultats de l'exploitation d'une parcelle de lessivage oblique ERLO dans la région de Libreville Gabon*. ORSTOM, Libreville, 15 p.
- Combeau A. 1962. *Erosion et conservation des sols*. Cours ORSTOM, Paris, 85 p.
- Fauck R. 1956. *Erosion et mécanisation agricole*. Bureau des sols en Afrique occidentale, 24 p.
- Fournier F. 1967. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 12(1) : 5-53.
- Fritsch J.M. 1992. *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants : Opération Ecerex en Guyane française*. ORSTOM, Paris, 392 p.
- Heusch B. 1969. L'érosion dans le bassin de Sebou Maroc : une approche quantitative. *Revue Géogr. Maroc* 15 : 109-128.
- Heusch B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. *Annales rech. Forestière Maroc* 12 : 1-176.
- Heusch B. 1971. Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc, C. R.*, 37 : 41-54.
- Heusch B. 1986. Cinquante ans de banquette de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22 2 : 153-162.
- Hudson N.W. et Jackson D.C. 1959. Results achieved in the measurement of erosion and runoff in Southern Rhodesia. In : *C.R. 3er Inter African Soils Conf. Dalaba*, section 2: 1-15.
- Hudson N.W. 1957. Erosion control research. Progress report on Henderson Research station. *Rhodesia Agric. J.* 54: 297-323.
- Hudson N.W. 1973. *Soil Conservation*. Batsford, London. 320 p.
- Kalms J.M. 1975. Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région Centre de Côte d'Ivoire. IRAT, Bouaké, 9 p. In : *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Edited in 1979 by Greenland et Lal. John Wiley. pp. 195-202.
- Lal R. 1976. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control. *IITA Monograph n° 1*, Ibadan 126 p.
- Meyer L.D., De Coursey D.G. et Romkens M.J. 1976. Soil erosion concepts and misconcepts. *Proc. Third Fed. Inter agency sed. Conf. US Geol. Survey*, Denver, USA.

- Roose E. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement à Séfa Sénégal. *Agron. Trop.* 22(2) : 123-152.
- Roose E. 1971. *Influences des modifications du milieu naturel sur l'érosion, le ruissellement, le bilan hydrique et chimique, suite à la mise en culture sous climat tropical Côte d'Ivoire et Haute-Volta*. Rapport ORSTOM, Abidjan, 22 p.
- Roose E. 1974. Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs. In : *13e Journées de l'Hydraulique*, Paris, rapport 10, 6 p.
- Roose E. 1976. *Le problème de la conservation de l'eau et du sol en République Populaire du Bénin : synthèse en 1976*. FAO/ORSTOM Cotonou, 34 p.
- Roose E. 1977. Application of the USLE in West Africa. In : *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*". Greenland et Lal (eds.). John Wiley. pp 177-188.
- Roose E. 1980. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. ORSTOM Paris, *Trav. et Doc.* 130 : 587 p.
- Roose E., Arrivets J. et Poulain J.F. 1978. *Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés issus de granite sous sorgho et sous une savane soudano sahélienne : Saria Haute-Volta, campagnes 1971 à 74*. ORSTOM, Paris, 123 p.
- Saccardy L. 1950. Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et eaux*, Alger 11 : 3-19.
- Sarrailh J.M. 1983. Les parcelles de ruissellement : synthèse de quatre années d'étude. In : *Le projet ECEREX : C.R. Les journées de Cayenne*. pp. 394-403.
- Sarrailh J.M. 1984. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais : ECEREX, 1ers résultats. *Bois et Forêts des Tropiques* 206 : 13-32.
- Smith D.D. et Wischmeier W.H. 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. *Amer. Geophys. Union Trans.* 386 : 88-896.
- Valentin C., Fritsch E. et Planchon O. 1987. Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane. In : *Land Development Management of Acid Soils*. IBSRAM Proc. n° 4. Bangkok: 67-81.
- Verney R., Volkoff B. et Willaime P. 1967. *Etude de l'érosion sur terres de Barre*. ORSTOM Cotonou, 14 p.
- Willaime P. 1962. *Etudes pédologiques de Boukombe*. ORSTOM Cotonou, 76 p.
- Wischmeier W.H. 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. *Proc. 1st Pan Am. Soil Cons. Congress Sao Paolo, Brazil*. pp. 237-244.
- Wischmeier W.H. 1974. *New developments in estimating water erosion*. 29e Meeting Soil Cons. Soc. Amer. Syracuse, New York. pp. 179-186.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. et Uhland R.E. 1958. Evaluation of factors in the soil loss equation. *Agron. Eng.* 39(8) : 458-462 et 474.

Woodruff C.M. 1948. Erosion in relation to rainfall, crop cover and slope on a greenhouse plot. *Soil Sci. Proc.* 12 : 475.

Zingg A.W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. *Agric. Eng.* 21 : 59-64.

Techniques culturales : effet travail du sol

Birot Y. et Galabert I. 1967. L'amélioration des rendements en agriculture par l'aménagement antiérosif et les techniques culturales dans l'Ader Douchi-Maggia Niger. In : *Colloque Fertilité des sols tropicaux*. Tananarive, Comm. n° 109 : 1316-1331.

Burnell R.E. et Larson W.E. 1969. Infiltration as influenced by tillage-induced roughness and pore-space. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 333 : 449-452.

Charreau C. et Nicou R. 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche ouest africaine et des incidences agronomiques. *Agron. Trop.* 26(9) : 903-978.

Charreau C. et Nicou R. 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche ouest africaine et des incidences agronomiques. *Agron. Trop.* 26(11) : 1183-1247.

Collinet J. et Lafforgue A. 1979. *Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta*. ORSTOM, Abidjan, 129 p.

Duley F.L. 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 4 : 60-64.

Fotsing J.M. 1992. Stratégies paysannes de gestion de terrains et de LAE en pays Bamiléké Ouest cameroun. *Bull. Réseau Erosion* n° 12 : 241-254.

Hulugalle N.R. 1988. Intercropping millet and Bambara groundnut on tied ridges in the Sudan Savannah of Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 2: 97-109.

Lafforgue A. et Naah E. 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM Hydrol.* 13(3) : 195-237.

Lal R. 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *Techn. Bull.* n° 1, IITA, Ibadan, 38 p.

Lamachère J.M. et Serpantié G. 1991. Valorisation agricole du ruissellement et LAE sur champs de mil au Yatenga Bidi. *Bull. Réseau Erosion* n° 11 : 88-104.

Leprun J.C., Silveira C.D. da et Sobral Filho R.M. 1986. Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cah. ORSTOM Pédol.* 222 : 223-233.

Mannering J.V., Meyer L.D. et Johnson C.B. 1968. Effect of cropping intensity on erosion and infiltration. *Agron. J.*, 602: 206-209.

Masson J.H. 1971. *L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités de terre érodée à l'échelle du champ*. Thèse Doc. Ing. USTL, Montpellier, 213 p.

- Rodriguez M.S. 1986. *Agronomic practices for reducing drought stress and improving maize grain yield in the semi-arid tropics of West Africa*. DUA/STRC/SAFGRAD Intern. Drought Symposium, Nairobi, Kenya.
- Roose E. et Asseline J. 1978. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé : II. Les charges solubles et solides sous diverses cultures. *Cah. ORSTOM Pédol.* 161 : 43-72.
- Roose E. et Cavalié J. 1988. New strategy of water management and soil conservation. Application in developed and developing countries. *ISCO 5: Land Conservation for Future Generations*. Rimwanich (ed.). Ministry of Agriculture, Bangkok, Thailand. pp. 913-924.
- Roose E. et Masson F.X. 1983. Consequences of heavy mechanization and new rotations on runoff and on loessial soil degradation in the North of France. In : *ISCO 3: Preserve the Land*. Honolulu. El-Swaify et Moldenhauer (eds.). Soil Cons. Soc. Amer., Ankeny. pp. 24-33.
- Roose E. et Piot J. 1984. Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau Upper-Volta. Symposium Harare. *AISH n° 144*: 485-498.
- Séguy L., Bouzinac S., Pacheco A. et Kluthcouski J. 1989. *Des modes de gestion mécanisée des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol, appliquées aux cerrados du Centre Ouest brésilien*. Doc. IRAT, Montpellier. 185 p.
- Shanholtz V.O. et Lilliard J.H. 1969. Tillage system effects on water use efficiency. *J. Soil and Water Cons.* 245: 186-189.
- Trévisan D. 1986. *Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés. Etude expérimentale sous pluies simulées*. Thèse 3ème cycle, Univ. Orléans/INRA/ORSTOM : 243 p.

LAE

- Bedu L. 1986. Contribution à la mise en valeur des sols du Yatenga. Projet d'aménagement du terroir de Ziga Burkina Faso. *Mémoire ENSAA-CNEARC-CIRAD*, Montpellier, France, 90 p.
- Bonvallet J. 1986. Tabias et Jessour du Sud Tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cah. ORSTOM Pédol.* 222 : 163-172.
- Collinet J. et Valentin C. 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM Pédol.* 174 : 283-328.
- Dezilleau D. et Minoza F. 1988. Dignes filtrantes : projet AFUP RISSIAM-BAM Burkina Faso. In : *Le Sahel en lutte contre la désertification*. Ed. Rochette, Cills-PAC. pp. 239-260.
- Duchaufour M. et Bizimana M. 1992. Restauration de la fertilité et conservation des eaux et des sols en région montagnaise du Burundi. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 161-178.
- Dugue 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*.

- Dumas J. 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM Pédol.* 3 4 : 307-333.
- El Amani S. 1983. *Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie*. Centre de Recherche du Génie Rural, Tunis, 69 p.
- Evenari M., Shanan L. et Tadmor N.H. 1968. Runoff farming in the desert. *Agron. J.* 60(1) : 29-38.
- Evenari M., Shanan L. et Tadmor N.H., 1971. *The Negev: The Challenge of a Desert*. Harvard University press, Cambridge, Mass.
- Finkel M. 1985. *Turkana water harvesting manual*. FAO, Rome.
- Fotsing J.M. 1992. Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en pays Bamiléké Cameroun. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 26, 4 : sous presse. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 241-254.
- Gosselin M. 1939. L'hydraulique en Tunisie. *Archives de l'Institut Pasteur de Tunis*, tome 3.
- Goujon P. et Bailly C. 1974. Aménagements antiérosifs et économie de l'Eau. *Comm. XIII Journées de l'Hydraulique, Paris*, rapport 11, 7 p.
- 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.
- Kampen J., Krishna J.H. et Pathak P. 1981. Rainy season cropping on deep vertisols in the semi arid tropics : effects on hydrology and soil erosion. In : *Tropical Agricultural Hydrology*. Hal et Russel (eds.). John Wiley. pp 257-271.
- König D. 1991. Contribution des méthodes agroforestières à la lutte antiérosive au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 185-191.
- König D. 1992. L'agriculture écologique agroforestière. Une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 130-139.
- Krantz B.A., Kampen J. et Virmani S.M. 1978. *Soil and water conservation and utilization for increased food production in the semi-arid tropics*. ICRISAT, Hyderabad, India.
- Lal R. 1974. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. IITA Ibadan, Nigeria. *Technical Bulletin* 1.
- Lamachère J.M. et 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.
- Matlon P.J., Vierich H. et Mc Intire J. 1987. *Annual report of ICRISAT/Upper Volta Economics programs 1984*. ICRISAT, Ouagadougou.
- Ndayizigiyé F. 1992. Valorisation des haies arbustives *Calliandra et Leucaena* dans la lutte contre l'érosion en zone de montagne Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 120-129.
- Ngarambé V. 1991. Les techniques culturales et l'aménagement de terroirs au Burundi. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 195-204.

- Ngarambé V. 1992. Stratégies paysannes en pays de montagne : le Burundi : résumé. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 179.
- Nyamulinda V. et Ngiruwonsanga. Lutte antiérosive et stratégies paysannes dans les montagnes du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 71-82.
- Pathak P., Miranda S. et El-Swaïfy S.A. 1985. Improved rainfed farming or semi-arid tropics: implications for soil and water conservation. In : *Soil Erosion and Conservation*. El-Swaïfy, Moldenhauer et Lo (eds.). S.W.C. Soc. of America. pp. 338-354.
- Perrier E.R. 1984. Soil and water management program for the 1981-84 growing seasons. *Final Report ICRISAT/SAFGRAD/Kamboïse Agricultural Experiment Station*, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Reij C., Mulder P. et Begemann L. 1988. Water harvesting for plant production. *World Bank Paper n° 91*, 123 p.
- Renard Ch. et Van den Beldt. 1991. Bordures d'*Andropogon* comme LAE éolienne au Sahel Niger. *Bull. Réseau Erosion* n° 11, p. 156.
- Rochette R. 1989. *Le Sahel en lutte contre la désertification*. CILLS/PACC/GTZ, Weikersheim, Allemagne, 592 p.
- Roose E.J. 1975. Natural mulch or chemical conditioner for reducing erosion in humid tropical areas. In : *Soil Conditioners*. SSSA Special Publ. 404: 131-138.
- Roose E. 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. *Agron. Trop.* 332 : 132-140.
- Roose E. 1987. GCES dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique Occidentale. Stratégies classiques et nouvelles. In : *Soil, Crop, Water Management Systems for Rainfed Agriculture in Semi-arid Zone*. Proceedings ICRISAT. pp. 55-72.
- Roose E. 1990. Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano sahélienne. Définitions, fonctionnement, limites et améliorations possibles. *Bull. Réseau Erosion*, 10 : 98-107.
- Roose E. 1990. *Un programme national de GCES au Burundi. Rapport de mission et d'atelier à Bujumbura*. Min. Environnement. Aménagement et Tourisme, Bujumbura Burundi ORSTOM Montpellier, 32 p.
- Roose E. et Bertrand R. 1971. Contribution à l'étude des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. *Agron. Trop.* 2611 : 1270-1283.
- Roose E. et Rodriguez L. 1990. Bilan de quatre années de GCES au Yatenga, Burkina Faso. *Bull. Réseau Erosion* 10 : 86-87.
- Roose E., Ndayizigiye F. et Sekayange L. 1992. La GCES : une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement rural sur les collines du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* n° 12 : 140-160. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 264, sous presse.

- Rwehumbiza F.B. et Roose E. 1992. La GCES, une nouvelle stratégie pour les systèmes de production de Haut Mgeta dans les Monts Uluguru, près de Morogoro en Tanzanie. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 201-211.
- Séguy L., Bouzinac S., Pacheco R. et Kluthcouski J. 1989. *Des modes de gestion mécanisée des sols et des cultures aux techniques de gestion en semis direct, sans travail du sol, appliquée aux cerrados du Centre Ouest brésilien*. Doc. IRAT, 185 p.
- Serpantié G. et 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, Ouagadougou.
- Tondeur G. 1950. *Erosion, spécialement au Congo belge*. Publication Ministère des Colonnes, Bruxelles, 3e édit., 240 p.
- Valentin C. et Roose E. 1982. Soil and water conservation problems in pineapple plantations of South Ivory Coast. In : *Soil Conservation: Problems and Prospects*. R.P.C. Morgan (ed.). John Wiley. pp. 239-246.
- Wischmeier W.H., Johnson C.B. et Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Cons.* 26(5) : 189-192.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. et Uhland D.R. 1958. Evaluation of factors in the soil loss equation. *Agric. Eng.*, 39 : 458-462, 474.

CHAPITRE 6 : RAVINES

- Boiffin J. 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.* 274 : 447-463.
- Boiffin J., Papy F. et Peyre Y. 1986. *Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux*. INRA, Paris.
- Bourougaa L. et Monjengue S. 1989. Fixation mécanique et biologique des ravines. Expérimentation dans la région semi-aride de Béni-Slimane, Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 9 : 19-29.
- Casenave A. et Valentin Ch. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *ORSTOM, Paris, série Didactiques*, 229 p.
- Cemagref. 1982. *La végétation d'espaces ravinés dans les Alpes du Sud*. Cemagref Grenoble, 54 p.
- Combes F. 1992. Les plantations RTM. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 52-56.
- De Noni G., Pourrut P. et Viennot M. 1987. Analyse de l'impact du "Nino" 1982-83 sur le milieu morphodynamique instable de l'Equateur. *Colloque "Climats et risques naturels"*, AFGP, Paris : 157-168.
- Deymier Ch. 1992. Les outils de génie civil dans la lutte contre l'érosion torrentielle. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 28-39.
- Fauk R., Moureau C. et Thomann C. 1969. Bilan de l'évolution des sols de Séfa Casamance, Sénégal après 15 années de culture continue. *Agron. Trop.* 24(3) : 263-301.

- Faure Y., Gourc J.P., Giraud A. et Bechetoille A. 1988. *Application des géotextiles à la protection contre l'érosion de formations instables Alpes*. Cemagref, ONF, Grenoble, 5 p.
- Geyik M.P. 1986. Watershed management field manual. Gully control. *FAO Conservation Guide 13/2*, Rome.
- Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G. et De Ploey J. 1987. Susceptibilité d'un sol limoneux à l'érosion par rigoles : essais dans le grand Canal de Caen. *Bull. Centre Géomorphol. CNRS de Caen* 33 : 84-106.
- Gray D.H. et Leiser A.T. 1982. *Biotechnological Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Gueyrand R. 1986. *Seuils à armature préfabriquée pour la petite correction torrentielle dans les Alpes du Sud*. Cemagref-ONF Grenoble, 28 p.
- Heusch B. 1988. *Aménagement d'un terroir et lutte contre l'érosion. Techniques de lutte contre l'érosion*. CNEARC, Montpellier, 199 p.
- Hoeblich J.M. 1992. Le lavaka malgache, une forme d'érosion utilisable. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 255-268.
- Hudson N.W. 1973. *Soil Conservation*, Batsford, London.
- Lafforgue A. et Naah E. 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM Hydrol.* 13(3) : 195-237.
- Lafren J.M. 1987. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. In : *Soil Conservation and Productivity*. Pla Sentis (ed.). ISCO 4, Maracay, Venezuela. pp. 798-809.
- Lilin Ch. et Koohafkan P. 1987. *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. FAO, Rome, 36 p.
- Meunier M. 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche* 5.
- Monnier G., Boiffin J. et Papy F. 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas de systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2) : 123-131.
- Mura R. 1990. *La correction torrentielle*. Cemagref, Grenoble, 9 p.
- Ouvry J.F. 1989. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux France. *Cah. ORSTOM Pédol.* 251 : 157-170.
- Poesen J. 1989. Conditions for gully formation in the Belgian loam belt and some ways to control them. *Soil Technology* 1: 39-52.
- Roose E. 1973. *Dix-sept années de mesures de l'Erosion et du Ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire*. ORSTOM Abidjan, 125 p. Thèse Doct. Ing. Fac. Sciences Abidjan, n° 20.

- Roose E. 1989. Bilan de trois années de coopération INRF-ORSTOM sur le thème de la G. CES. *Bull. Réseau Erosion* 9 : 13 et rapport ORSTOM Montpellier, 25 p.
- Stocking M. 1980. Examination of the factors controlling gully growth. In : *Assessment of Erosion*. De boodt et Gabriels (eds.). John Wiley. pp. 505-521.
- Valentin C. 1978. *Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques et interprétation agronomique*. ORSTOM Abidjan, Côte d'Ivoire, 141 p.
- Valentin C. 1981. *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques Agadès : Niger*. Thèse 3e cycle, Paris 7, ORSTOM, Paris, série Etudes et Thèses, édit. 1985, 259 p.
- Valentin C. et Ruiz Figueroa J.F. 1987. Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In : *Micromorphologie des Sols*, AISS/AFES Paris. pp. 401-408.
- Watson D.A., Laflen J.M. et Franti T.G. 1986. Estimating ephemeral gully erosion. *ASAE Paper* 86: 2020.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. 1960. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7th Congrès AISS* 1: 418-425.

CHAPITRE 7 : MOUVEMENTS DE MASSE

- Avenard J.M. 1989. Sensibilité aux mouvements de masse. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 119-130.
- CEMAGREF. 1985. *Les éléments techniques de drainage de glissements de terrain*.
- Ferry O. 1987. *Conservation des sols et participation paysanne en Commune de Kinyami : Rwanda*. AFUP, France. 1 p.
- Heusch B. 1988. *Aménagement d'un terroir : techniques de lutte contre l'érosion*. CNEARC, Montpellier, 199 p.
- Moeyersons J. 1989. Les glissements de terrain au Rwanda occidental : leurs causes et les possibilités de leur prévention. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 131-150.
- Temple P. et Rapp A. 1972. Landslides in the MGETA area, Western Uluguru mountains, Tanzania. Geomorphological effects of Suddan heavy rainfall. In : *Studies of Soil Erosion and Sedimentation in Tanzania*. Rapp, Berry et Temple (eds.). Geografiska Annales 54(3-4) : 157-194.

CHAPITRE 8 : EROSION EOLIENNE

- Bagnold R.A. 1954. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Chapman and Hall, UK. 265 p.
- Bagnold R.A. 1937. Transport of sand by wind. *Geogr. J.* 89-436.
- Bourgoin J. 1956. *Rapport sur les tracés de voies ferrées pour l'évacuation des minerais de Fort Gourand et Akjoujt*. BCEOM, 57 p.

- Casenave A. et Valentin C. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne*. ORSTOM Paris, Série Didactique, 229 pages.
- Causin A. 1956. *Etude des barkkanes à l'est de Port-Etienne*. Dir. Gén. Trav. Publ. AOF., Mauritanie, 17 p.
- Chepil W.S. et Woodruff N.P. 1963. The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy* 15 : 211-302.
- Combeau A. 1977. *Erosion et conservation des sols*. ORSTOM, Paris, 85 p.
- De Ploey J. 1980. Some field measurements and experimental data on wind-blown sands. In : *Assessment of Erosion*. De Boodt et Gabriels (eds.). John Wiley, UK. pp. 541-552.
- Fryrear D.W. 1989. Wind erosion : mechanics, measurement and control. In : *ICRISAT-INRAN Workshop*, Niamey, Niger. pp. 117-124.
- Guyot G. 1963. Influence d'un brise-vent sur le rendement d'un champ de céréales. *Ann. Agron.* 4. Paris.
- Guyot G. 1969. L'érosion éolienne. *BIT* n° 237 : 117-124.
- Heusch B. 1988. *Aménagement de terroir : techniques de lutte contre l'érosion*. CNEARC Montpellier, 199 p.
- Mainguet M. 1983. Dunes vives, dunes fixées, dunes vêtues : une classification selon le bilan d'alimentation, le régime éolien et la dynamique des édifices sableux. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd 45* : 265-285.
- Renard Ch. et Vandenbeldt R. 1991. Bordures d'*Andropogon* comme LAE éolienne au Niger : résumé. *Bull. Réseau Erosion* n° 11 : 156.

CHAPITRE 9 : SAVANES D'AFRIQUE OCCIDENTALE

- Dugue P. 1986. L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village. CIRAD-DSA, Montpellier, *Collection Système Agraire* n° 6.
- Dugué P. 1988. *Possibilités et limites de l'intensification des cultures vivrières en zone soudano-sahélienne : le cas du Yatenga*. Thèse ENSA-M Montpellier, 252 p.
- Hijkoop J., Poel P. van der et Kaya B. 1991. *Aménagement antiérosif et gestion de terroir : une lutte de longue haleine*. IER Bamako - Kit Amsterdam, 153 p.
- Roose E.J. 1980. *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Thèse Doct. es Sciences Orléans, ORSTOM Paris, Travaux et Documents n° 130, 569 p.
- Roose E. 1985. *Rapport de mission auprès de la DRSPR dans la région du Sud Mali 3-17/12/84*. KIT, Amsterdam.

- Roose E. 1987. Gestion Cons. de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysges soudano-sahéliens d'Afrique occidentale. Stratégies classiques et nouvelles. In : *C. Rendu Séminaire ICRISAT-INRAN*, Niamey. pp. 55-72.
- Roose E.J. 1991. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de Conservation de l'eau et des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique occidentale. In : *Aridité, contrainte au développement*. ORSTOM Montpellier, Collection Didactique : 481-506.
- Roose E. et Piot J. 1984. Runoff, erosion and Soil fertility restoration on the Mossi Plateau. *IASH Publication* n° 144: 485-498.
- Roose E. et Rodriguez L. 1990. *Aménagement de terroirs au Yatenga. Quatre années de G.CES : bilan et perspective*. ORSTOM Montpellier, 40 p.
- Roose E., Dugué P. et Rodriguez L. 1992. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso. *Revue Bois et Forêts des Tropiques* n° 233 3 : 49-63.
- Wright P. 1985. *La gestion des eaux de ruissellement*. Projet Agroforesterie OXFAM Ouagadougou.

CHAPITRE 10 : EVOLUTION DU BOCAGE BAMILEKE

- Champaud J. 1973. *Atlas régional Ouest 2, commentaire des cartes*. ORSTOM, Yaoundé, 118 P. + 10 cartes.
- Ducret G. et Fotsing J.M. 1987. Evolution des systèmes agraires à Bafou Ouest-Cameroun. *Rev. de Géol. du Cam.* VII(1) Yaoundé, : 1 à 18.
- Ducret G. et Grangeret I. 1986. *Quelques aspects des systèmes de cultures en pays Bamiléké*. CUDS, Dschang, 33 p. multigraphiés.
- Dongmo J.L. 1981. *Le dynamisme bamiléké*. vol. 1, La maîtrise de l'espace agraire. Yaoundé, CEPER, 424 P.
- Fotsing J.M. 1989. Colonisation agricole et évolution de l'élevage sur les pentes sud des monts Bamboutos Ouest-Cameroun. *Rev. de Géol. du Cam.* IX(2) Yaoundé, : 118 à 138.
- Fotsing J.M. 1990. Transformation des pratiques pastorales en milieu d'altitude densément peuplé : les versans méridionaux des monts Bamboutos Ouest-Cameroun. *Les Cahiers de la Recherche Développement* N° 27, Montpellier, : 32 à 46.
- Fotsing J.M. 1992a. En marge de l'UCCAO : les associations des non caféiculteurs de la province de l'ouest du Cameroun. *Les Cahiers de la Recherche Développement* (sous presse).
- Fotsing J.M. 1992b. Diagnostic des problèmes d'érosion et éléments de solution en Pays Bamiléké Cameroun. *Les Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie* (sous presse).
- Morin S. 1989. *Hautes terres et bassins de l'ouest-Cameroun*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III, Tomes I et II, 1190 p.
- Ngoufo R. 1988. *Les Monts Bamboutos : environnement et utilisation de l'espace*. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université de Yaoundé, T I , 349 p.

- Olivry J.-C. 1974. *Régimes hydrologiques en pays bamiléké - la Mifi-sud*. Tome 2 : Interprétation des mesures : modèles et bilan, basses eaux et crues. Yaoundé, 290 p.
- Roose E. 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, ORSTOM, Paris, 108 p.
- Segalen P. 1967. Les sols et la géomorphologie au Cameroun. *Cah. ORSTOM Pédol.* 52 : 137-147.
- Suchel J.B. 1987. *Les climats du Cameroun*. Thèse de Doctorat d'Etat ès-lettres, Université de Bordeaux III, Bordeaux, 3 vo. 1186 p. + 1 vol. Atlas.
- Suchel J.B. 1989. Les privilèges climatiques du pays bamiléké. *Les Cahiers d'Outre Mer* 42(165) : 29-52.

CHAPITRE 11 : RWANDA

- Balasubramanian V. et Sekayange L. 1992. Effet de la culture en couloir sur les propriétés du sol et les performances des arbustes et des cultures vivrières dans un environnement semi-aride au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 180-190.
- Berding F. 1992. *Les facteurs de l'érosion : état actuel des connaissances*. Kigali, Rwanda, Minagri, Séminaire Nat. sur la stratégie nat. de conservation des sols. 26 p.
- Bitoki O., Kaboneka S. et Duchaufour H. 1990. *L'agroforesterie. Du fourrage, mais pour quel objectif ?* Sém. Agrostologie, Bujumbura, ISABU. 18 p.
- Delepierre G. 1982. Les régions agro-climatiques en relation avec l'intensité de l'érosion du sol. *Bull. Agric. Rwanda* 2 : 87-95.
- Dressler J. et Neuman I., 1982. Agriculture de couverture du sol : un impératif pour la LAE au Rwanda. *Bull. Agric. Rwanda* 4 : 215-222.
- Duchaufour H. 1991. Bilan de dix ans de recherches en parcelles et bassin versant au Burundi. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 36-37.
- Duchaufour H. et Bizimana M., 1992. Restauration de la fertilité et conservation des eaux et des sols en région montagneuse au Burundi. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 161-178.
- Egli A. 1985. La conservation des sols à l'aide des méthodes agroforestières : le cas du Rwanda. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* 20(3 + 4) : 561-587.
- Gasana J.K. 1990. *Classification des régions agro-bio-climatiques du Rwanda*. Doc. travail du Min. Agriculture de Kigali.
- Hartmanshenn T. 1991. *Analyse agroécologique de la zone d'action du projet d'intensification de la production vivrière IPV*. Projet IPV - Minagri-GTZ Kigali, Rwanda : 75 p. + Ann.
- Kang B.T., Wilson G.F. et Lawson T.L. 1984. *Alley cropping: a stable alternative to shifting cultivation*. IITA, Ibadan, 22 p.

- König D. 1992. L'agriculture écologique agroforestière : une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 130-139.
- Moeyersons J. 1989. *La nature de l'érosion des versants au Rwanda*. Thèse Univ. Leuven. Annales Sciences Economiques. Musée de Tervuren Belgique. Vol. 19 : 379 p.
- Moeyersons J. 1990. Les glissements de terrain au Rwanda occidental. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 131+150.
- Ndayizigiye F. 1990. Aperçu sur les pratiques de conservation des sols et de gestion de l'eau au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 10 : 87-97.
- Ndayizigiye F. 1991. Aménagement des collines sur le plateau central du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 173-184.
- Ndayizigiye F. 1992. Valorisation des haies arbustives dans la lutte contre l'érosion en zone de montagnes Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 120-129.
- Ndayizigiye F. 1993. *La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols au Rwanda. Analyse des techniques antiérosives et de leurs effets sur la productivité des terres*. Thèse Doct. Géogr. Phys. Univ. Strasbourg, 246 p.
- Neumann I. 1983. Use of trees in smallholder agriculture in tropical highlands. In : *Environmentally-sound Agriculture*. Lockerretz W. (ed.). Praeger, New York. pp. 351-374.
- Neumann I. 1983. La promotion des cultures associées au projet. *Etude et Expériences* n° 4. PAP, Nyabisindu, Rwanda. 75 p.
- Neumann I. et Pietrowicz P. 1985. L'agroforesterie à Nyabisindu. *Etude et Expériences* n° 9 PAP. Nyabisindu, Rwanda.
- Ngarambe V. 1990. Les techniques culturales et l'aménagement de terroir au Burundi. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 195-204.
- Nyamulinda V. 1989. méthodes autochtones de conservation des sols en Préfecture de Ruhengeri. *Bull. Agric. Rwanda* 3 : 147-158.
- Nyamulinda V. 1991. Erosion de versants sous culture et transports solides dans les bassins des hautes terres de Ruhengeri au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 11 : 38-63.
- Nyamulinda V. et Ngiruwonsanga V. 1992. Lutte antiérosive et stratégies paysannes dans les montagnes du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 71-82.
- PAP. 1984. L'érosion et la lutte contre l'érosion. *Fiche techn.* n° 1, PAP, Nyabisindu, 36 p.
- PAP. 1985. L'arbre et la haie dans l'exploitation paysanne. *Fiche technique* n° 3, PAP, Nyabisindu.
- PAP. 1987. Agroforesterie à Nyabisindu. *Fiche technique* n° 9. PAP, Nyabisindu.
- PAP. 1990. Essais de valorisation des talus dans le système des terrasses progressives. *Fiche technique* n° 10. PAP, Nyabisindu.

- Roose E., Ndayizigiye F., Nyamulinda V. et Byiringiro E. 1988. La gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols G.CES : une nouvelle stratégie de lutte antiérosive pour le Rwanda. *Bull. Agric. Rwanda* 21(4) : 264-277.
- Rutungu V. 1992. *Synthèse des connaissances sur la fertilité des terres et la fertilisation des cultures au Rwanda 1960-1990*. MINAGRI, Kigali, Projet PNUD-FAO, 122 p.
- Sabatier J. 1986. *Lutte antiérosive et développement sur la bordure orientale du Plateau Central du Rwanda*. Sémin. CIRAD-DSA, Montpellier.
- Tassin J. 1992. Agroforesterie, Conservation des sols et réalités paysannes. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 191-193.
- Wassmer P. 1981. *Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion des sols et de ses conséquences dans la préfecture de Kiboye*. Thèse 3e cycle, Univ. Strasbourg.
- Yamoah C.F., Agboola A.A. et Mulongoy K., 1986. Nutrient contribution and maize performance in alley cropping systems. *Agroforestry systems* 4: 247-254.

CHAPITRE 12 : HAÏTI

- Albrecht A. 1990. *Note sur la distribution des sols du bassin versant Bitako-Petite rivière de Nippes péninsule sud de la République d'Haïti*. ORSTOM-Martinique, 11 p.
- Bellande A. 1987. *Rationalité socio-économique des systèmes de production dans la zone de Madian-Salagnac*. Thèse, Université Mac Gill, 165 p.
- Bouchet G. et Pierre Jean I. 1985. *Actions de développement dans les marnes basaltiques de Laval-Poly*. Projet FAC/CEE : 14 p.
- Brochet M., Cavalie J., Pillot D. et de Reynal V. 1980. *Espace rural et société agraire en transformation*. Institut français, 232 p.
- Bureau J.C. 1986. *Note de synthèse sur les actions de conservation des sols en Haïti*. Mission de coopération. Port au Prince, 90 p.
- Cabidoche Y.M. 1984. *Reconnaissance pédologique dans le district de Jacmel*. INRA-Guadeloupe, 41 p.
- Cabidoche Y.M. 1989. *Distribution et propriétés des sols sur le transect Madian-Salagnac-Aquin*. INRA-Guadeloupe, 35 p.
- GRET/FAMV. 1991. *Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne*. 489 p.
- Groupe de Recherche Développement GRD. 1979. *Mode de tenure en Haïti et degré de sécurité à Madian-Salagnac*. 9 p.
- Guarrigue N. 1990. *Place de l'arbre dans le paysage agricole : étude des jardins boisés du bassin versant de Petite rivière de Nippes Haïti*. CNEARC-PRATIC, Montpellier. 86 p.

- Jean Y. 1989. La conservation de l'eau et des sols à la plaine d'Aquin Haïti. *conjonction* n° 182, 13 p.
- Kermel-Torres D. et Roca P. 1990. *Bilan prospectif d'une agriculture résiliente*. ORSTOM/CNRS-CEGET Bordeaux, 9 p.
- Koohafkan A.P. et Lilin C. 1987. *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. FAO, Rome. 36 p.
- Lilin C., Brochet M. et Smolikowski B. 1988. *Rapport de mission*. Mission de coopération-PRATIC, Montpellier. 12 p.
- Murray C.F. 1979. *Terraces, trees and haitian peasants : 25 years of erosion control in Haiti*. USAID, 109 p.
- Roose E. 1991. *Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols GCES, outil de gestion de terroirs*. CNEARC/ORSTOM Montpellier, 106 p.
- Saint-Dic R. 1981. *Systèmes de tenure et lutte anti-érosive en Haïti*. Thèse de Msc, Université de Laval Canada, 81 p.
- Smolikowski B. 1989. Aménagements des bassins versants en Haïti. *Synthèse atelier Conjonction* n° 182-183, 6 p.
- Smolikowski B. 1989. *Quelle stratégie pour l'aménagement intégré en Haïti ? Actes du colloque inter-régional Guadeloupe*. Conseil Général/UNESCO, 14 p.

CHAPITRE 13 : EQUATEUR

- Almeida G., De Noni G. *et al.* 1984. *Los principales procesos erosivos en Ecuador*. PRONAREG-PRONACOS-ORSTOM, Quito, 31 p. con un mapa del país a escala 1/1000.000.
- Delaunay. D. 1989 Espacios demográficos y redes migratorias, *Collection : Etudes de Géographie*, Corporación Editora Nacional, Colegio de Geografos del Ecuador, Quito. pp. 71-98.
- De Noni. G. 1986 Breve historia de la erosión en el Ecuador. *Documentos de investigación* n°6, CEDIG-ORSTOM, Quito. pp. 15-23.
- De Noni G. et Viennot M. 1985. Estudio de algunos procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador 3200 m-4800 m. *Revista colombiana de la ciencia del suelo, Bogotá XVI(1) : 23-31*.
- De Noni G. et Viennot M. 1987. De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain: la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes. *Colloque sur les sociétés rurales de montagne Andes et Himalaya*, CNRS- Université de Grenoble. pp. 61-65.
- De Noni G. et Viennot M. 1989. Le projet DNA-ORSTOM sur l'Etude de l'érosion et des pratiques de conservation des sols en Equateur. *Bull. Réseau Erosion*, ORSTOM, Montpellier. 5 p.
- De Noni G. et Trujillo G. 1989. Quelques réflexions au sujet de l'érosion et de la conservation des sols en Equateur. *Colloque et Séminaire "Equateur 1986"*, vol.1, Edit. de l'ORSTOM, Paris, p. 133-143.

- De Noni G., Nouvelot J.F. et Trujillo G. 1984. Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study. *Sixth International Soil Classification Workshop*, Chile and Ecuador, part 1. pp. 263-274, SMSS Washington, PUCC Santiago de Chile.
- De Noni G., Nouvelot J.F. et Trujillo G. 1986. Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos: las parcelas de Alangasi y Ilalo. CEDIG-ORSTOM, *Documentos de investigación* N° 6, Quito. pp. 35-47.
- De Noni G., Viennot M. et Trujillo G. 1986. L'érosion et la conservation des sols en Equateur. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22(2), Paris, pp. 235-245.
- De Noni G., Viennot M. et Trujillo G. 1989-90. Mesures de l'érosion dans les Andes de Equateur. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1-2) : 183-196. Paris.
- Estrada Ycaza J. 1977. Regionalismo y migración, *Publicaciones del Archivo histórico del Guayas*, Guayaquil. 296 p.
- Gondard P. et Département de Géographie de PRONAREG. 1981-83. *10 cartes en couleurs, 1/200.000, d'utilisation actuelle des sols et des formations végétales dans la Sierra de l'Equateur.*
- Roose E. 1968. *Mesure de l'érodibilité d'un sol facteur K sur la parcelle de référence de Wischmeier. Protocole standard et discussion.* ORSTOM, Abidjan, 10 p. revue en 1988.
- Roose E. et Bertrand R. 1971 Contribution à l'étude des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. *Agr. Trop.*, Paris, p. 1270-83
- Roose E. 1977. *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales.* ORSTOM, Paris, 108 p.
- Roose E. 1986. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables? Analyse de deux démarches de conservation de l'eau et des sols chez les petits fermiers de la zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. *Cah. ORSTOM Pédol.* XXII(2) : 81-92. Paris.
- Roose E. 1987. *Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale: stratégies anciennes et nouvelles.* Communication au Séminaire "Gestion des eaux, des sols et des plantes", Niamey. 17 p.
- Santana R. 1983. *Campesinado indígena y el desafío de la modernidad.* CAAP, Quito. 209 p.
- Wischmeier W.H. et Smith D 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* N° 537, Washington DC. 58 p.

CHAPITRE 14 : ALGERIE

- Arabi M. 1991. *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen.* Thèse doctorat géographie, Grenoble. 276 p.
- Arabi M. et Roose E. 1989. Influence de quatre systèmes de production en zone méditerranéenne de moyenne montagne en Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 9 : 39-51.

- Arabi M. et Roose E. 1992. *Water and soil fertility management G.CES. A new strategy to fight erosion in Algerian mountains*. Paper to ISCO7, Sydney : 11 p.
- Aubert G. 1987. Erodibilité des sols de la région d'Ouzera. *Bull. Réseau Erosion* 8 : 97-99.
- Demmack A. 1982. *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale*. Thèse doct. ing. Paris. 323 p.
- Heusch B. 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Annale Rech. Forestière du Maroc*, tome 12, 176 p.
- Heusch B. 1986. Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM Pédol.* 222 : 153-162.
- Kouidri R., Arabi M. et Roose E. 1989. Premiers résultats de mesure du ruissellement et de l'érosion en nappe : Medea, Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 9 : 33-38.
- Mazour M. 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 300-313.
- Pouget M. 1974. *Etude agro-pédologique de la région d'Ouzera*. ANRH, Alger. 72 p.
- Roose E. 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : 20 années de mesures. *Travaux et Documents*, ORSTOM, Paris, n° 78 : 108 p.
- Roose E. 1987. Evolution des stratégies de lutte antiérosive en Algérie ; nouvelle démarche : la GCES. Séminaire INRF de Medea Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 7 : 91-96.
- Roose E. 1988. *Water efficiency and soil fertility conservation on steep slopes of some tropical countries*. Workshop SWCA Puerto Rico. Moldenhauer and Hudson (eds.), Ankeny USA. 296 p.
- Saccardy L. 1949. Nécessité de la lutte contre les érosions. Méthodes modernes de conservation des sols et des eaux. *Bull. Techn. des ISA*, n° 142, *Revue Terres et Eaux*, n° 9, Alger.

CHAPITRE 15 : PAYS DE CAUX

- Auzet V. 1987. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques*. Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture, Paris, CEREG, Strasbourg, Organisation-Environnement, 53 p. + annexes.
- Auzet V. 1990. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects aménagement*. Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture, CEREG, Organisation-Environnement, 39 p. + annexes.
- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Maucorps J. et Ouvry J.F. 1990. An approach to assess erosion forms and erosion risks on agricultural land in Northern Paris Basin France. In : *Soil Erosion on Agricultural Lands*. Boardman, Foster et Dearing (éds.). John Wiley, London, pp. 383-400.
- Boiffin J., Papy F. et Peyre Y. 1986. *Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux*. Rapport INA-PG, INRA, 154 p. + annexes.

- Boiffin J., Papy F. et Eimberck J. 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 8(81) : 663-673.
- Boiffin J. et Monnier G. 1991. Simplification du travail du sol et érosion hydrique. *Perspectives Agricoles* n° 161-162-163. pp. 42-48.
- Boardman J. et Robinson D.A. 1985. Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the Downs around Lewes and Brighton, autumn 1982. *Applied Geography* 5: 243-258.
- Bresson L.M. et Boiffin J. 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Géoderma* 47. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. pp. 301-325.
- CEMAGREF. 1986-1987. *Les dégâts causés par les pluies intenses dans le bassin du Croult Val d'Oise*. Conseil Général du Val d'Oise, Ministère de l'Environnement, 3 rapports, 236 p.
- Comité d'Aménagement de la Canche et de l'Authie, SRAE du Nord - Pas de Calais. 1978, 1979. *Etude sur l'érosion des terres agricoles dans le Val de Canche*. 4 documents, 132 p. + annexes.
- Daix C. 1991. *Analyse du ruissellement en fonction de la dynamique spatiale des états de surface du sol. Approche à l'échelle du bassin versant élémentaire en Pays de Caux. Mémoire de fin d'études*. 35 p. + annexes.
- De Ploey J. 1988. No tillage, experiments in the Central Belgium loess belt. *Soil Technology* 1 : 181-184.
- Deville D. 1990. *La réduction des travaux du sol lors de l'implantation des betteraves. Comparaison de différentes techniques étudiées en Haute Normandie pendant la campagne 1989*. Institut Supérieur Agricole de Beauvais. ITB. Rapport de stage.
- Duvoux B. 1990. *Protection rapprochée des cours d'eau contre les effets de l'érosion des terres agricoles*. CEMAGREF. 86 p.
- Foster G.R. 1985, *Understanding ephemeral gully erosion concentrated flow erosion*. Purdue Univ., West Lafayette, 29 p. + annexes.
- Gril J.J. et Duvoux B. 1991. *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes Américaines*. CEMAGREF. 157 p.
- Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G. et De Ploey J. 1987. Susceptibilité d'un sol limoneux à l'érosion par rigoles: Essais dans le grand canal de Caen. *Bulletin du Centre de Géomorphologie de Caen*. CNRS n°33 pp. 85 à 105.
- Hudson N. 1971. *Soil Conservation*, Second Edition. Cornell University Press. 322 p.
- King, Papy F. et Daix C. 1992. *Ruissellement et dynamique spatiale des états de surface de trois bassins versants élémentaires du Pays de Caux*. Symposium International: Erosion des terres agricoles en milieu tempéré. Saint Cloud. (sous presse)
- Kirkby M.J. et Morgan R.P.C. 1978. *Soil Erosion*. British Geomorphological Research Group. 440 p.

- Laval F. et Frileux H. 1991. *Réaménagement hydraulique d'un bassin hydrographique soumis à l'érosion: Propositions techniques et coûts. Etude du bassin du Mauconduit*. Rapport de stage. Agence de l'Eau Seine Normandie, délégation de Haute Normandie. AREAS 30 p. + annexes.
- Ludwig B., Boiffin J. et Masclet A. 1992. Origine spatiale des sédiments et contribution relative aux pertes en terre de différentes formes d'érosion au sein d'un bassin versant cultivé. In : *Farm Lands Erosion in Temperate Plains Environments and Hills*. 25-29 May 1992, Saint Cloud.
- Martin L. 1979. *Accelerated soil erosion from tractor wheelings: a case study in Mid-Bedfordshire, England*. Col. sur l'érosion des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Univ. Louis Pasteur Strasbourg, INRA: pp. 151-161.
- Ouvry J.F. 1982. Localisation et description des sites d'érosion des sols agricoles du bassin inférieur de l'Yères Seine maritime. *Mémoires DDA*, ENSA Rennes. INRA Rennes et Rouen, 72 p. + annexes.
- Ouvry J.F. 1987. *Bilan des travaux. Campagne 1986-1987*. Rapport AREAS. 153 p.
- Ouvry J.F. 1989-1990. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à érosion par ruissellement concentré: expérience du Pays de Caux. *Cah. ORSTOM Pédol.* XXV(1-2) : 157-169.
- Ouvry J.F. 1992. L'évolution de la grande culture et l'érosion des terres dans le Pays de Caux. *Bull. Assoc. Franç., Paris 2* : 107-113.
- Papy F. et Boiffin J. 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 881 : 745-756.
- Papy F. et Douyer C. 1991. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie* 11 : 201-215.
- Papy F. et Souchere V. 1992. *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion de talweg: Une démarche d'aménagement de l'espace*. Symposium International: Erosion des terres agricoles en milieu tempéré. Saint Cloud.
- Poujade C. 1989. *La maîtrise du ruissellement et de l'érosion par concentration du ruissellement par les pratiques culturales, à l'échelle d'un bassin versant : approche méthodologique*. Institut National Agronomique Paris-Grignon. INRA-SAD. Mémoire. 62 p. + annexes.
- Raheliarisoa M.A. 1986. *Influences des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux*. Thèse Orléans, 297 p.
- Roose E. et Masson F.X. 1983. Consequence of heavy mechanization and new rotation on runoff loessial soil degradation in north France. In : *Soil Erosion and Conservation*. El Swaify, Moldenhauer et Lo (eds.). pp. 24-33.
- Roose E. et Cavalie J. 1988. *Nouvelle stratégie de gestion conservatoire des eaux et des sols: Application en France et en Afrique occidentale*. Communication à la conférence internationale ISCO 5. Bangkok 18-29/01/88.

Savat et De Ploey J. 1982. Sheetwash and rill development by surface flow. In : *Badland Geomorphology and Piping*. R. Bryan et A. Yair (eds.). Geo Books, Norwich. pp. 113-126.

Soil Conservation Service. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Engineering Division. 100 p. + annexes.

CAHIERS TECHNIQUES DE LA FAO

BULLETINS PÉDOLOGIQUES DE LA FAO

1	Soils of the arid zones of Chile, 1965 (A*)	43	Organic recycling in Africa, 1980 (A)
2	A survey of soils laboratories in sixty-four FAO member countries, 1965 (A*)	44	Aménagement des bassins versants, 1986 (A C* E F)
3	Guide on general and specialized equipment for soils laboratories, 1966 (A*)	45	Organic materials and soil productivity in the Near East, 1982 (A avec sommaire en Ar)
4	Guide to sixty soil and water conservation practices, 1966 (A*)	46	Blue-green algae for rice production – a manual for its promotion, 1981 (A)
5	Le choix des sols à cacao, 1966 (A* E* F*)	47	Le recyclage des résidus agricoles organiques en Afrique, 1982 (F)
6	L'interprétation des photographies aériennes dans les études pédologiques, 1967 (A* C* E* F)	48	Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study, 1982 (A)
7	A practical manual of soil microbiology laboratory methods, 1967 (A*)	49	Application des systèmes fixateurs d'azote dans l'amélioration et l'aménagement des sols, 1986 (A C* E F)
8	Soil survey interpretation and its use, 1967 (A*)	50	Garder la terre en vie: l'érosion des sols – ses causes et ses remèdes, 1983 (A E F)
9	La préparation des rapports de prospection pédologique, 1970 (A* E* F*)	51	El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina, 1983 (E)
10	Méthodes d'analyse physique et chimique des sols et des eaux, 1970 (A E F)	52	Directives: évaluation des terres pour l'agriculture pluviale, 1988 (A C** E F)
11	Manuel pour les enquêtes de fertilité des sols effectuées dans les champs des agriculteurs, 1970 (A E F)	53	Systèmes de production améliorés susceptibles de remplacer l'agriculture itinérante, 1987 (A E F)
12	The response of wheat to fertilizers, 1971 (A)	54	Conservation des sols et des eaux: façons culturales appropriées, 1989 (A C E F)
13	Land degradation, 1971 (A* C*)	55	Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: directives, 1989 (A C E F)
14	Amélioration de la fertilité des sols en Afrique, 1971 (A* F*)	56	Aménagement du sol: production et usage du compost en milieu tropical et subtropical, 1988 (A E F)
15	Legislative principles of soil conservation, 1971 (A)	57	Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides, 1990 (A C F)
16	Effects of intensive fertilizer use on the human environment, 1972 (A)	58	Guidelines: land evaluation for extensive grazing, 1991 (A)
17	Les éléments-traces dans les sols et en agriculture, 1972 (A E* F)	59	Nature and management of tropical peat soils, 1988 (A)
18	Le calibrage des essais de sols pour les recommandations en matière d'engrais, 1973 (A E*)	60	Soil conservation for small farmers in the humid tropics, 1989 (A E)
19	Interprétation des prospections pédologiques à l'usage de l'ingénieur, 1974 (A E* F*)	61	Les retombées radioactives dans les sols, les cultures et les aliments, 1991 (A F)
20	Fertilizer legislation, 1973 (A* E)	62	Management of gypsiferous soils, 1990 (A Ar**)
21	Sols calcaires, 1973 (A* F*)	63	Micronutrient assessment at the country level: an international study, 1990 (A)
22	Approaches to land classification, 1974 (A*)	64	Les raisons du succès ou de l'échec des projets de conservation des sols, 1993 (A F)
23	Management properties of ferralsols, 1974 (A)	65	Status of cadmium, lead, cobalt and selenium in soils and plants of thirth countries, 1992 (A)
24	L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique, 1974 (A* E F)	66	Manual de sistemas de labranza para América Latina, 1992 (S)
25	Sandy soils, 1975 (A)	67	Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya, 1993 (A)
26	Planning and organization of fertilizer development in Africa, 1975 (A*)	68	Field measurement of soil erosion and runoff, 1993 (A)
27	Emploi des matières organiques comme engrais, 1975 (A E* F*)	69	Soil tillage in Africa: needs and challenges, 1993 (A)
28	S.I. Units and nomenclature in soil science, 1975 (A)	70	Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), 1994
29	Land evaluation in Europe, 1975 (A*)		
30	La conservation des sols dans les pays en développement, 1976 (A Ar C* E* F*)		
31	Prognosis of salinity and alkalinity, 1976 (A)		
32	Cadre pour l'évaluation des sols, 1976 (A* C* E* F)		
33	La conservation et l'aménagement des sols dans les pays en développement, 1986 (A F)		
34	Assessing soil degradation, 1977 (A*)		
35	Organic materials and soil productivity, 1977 (A C*)		
36	Organic recycling in Asia, 1978 (A* C*)		
37	Improved use of plant nutrients, 1978 (A C*)		
38/1	Soil and plant testing and analysis, 1980 (A)		
38/2	Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations, 1980 (A* E*)		
39	Salt-affected soils and their management, 1988 (A Ar)		
40	Chine: recyclage des matières organiques en agriculture, 1977 (A E F)		
41	Chine: multiplication de l'azolla et technologie de la production artisanale de biogaz, 1981 (A E F)		
42	Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation, 1990 (A C* F)		

Disponibilité: février 1993

A	-	Anglais	Multil.	-	Multilingue
Ar	-	Arabe	*		Epuisé
C	-	Chinois	**		En préparation
E	-	Espagnol			
F	-	Français			
P	-	Portugais			

On peut se procurer les Cahiers techniques de la FAO auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement à la Section distribution et ventes, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.

Après analyse des stratégies paysannes et des stratégies modernes de lutte antiérosive, ce document propose une nouvelle approche, la GCES, basée sur la valorisation des terres et du travail des paysans. Sur le plan pratique, la GCES vise à améliorer l'infiltration, à valoriser la biomasse et à mieux gérer les nutriments disponibles pour la croissance des plantes. Cette synthèse est étayée par les résultats de 30 années de recherches, essentiellement en Afrique francophone, et à travers la présentation de dix études de cas en Afrique de l'Ouest, en montagne (Haïti, Equateur, Rwanda, Algérie) et en région tempérée (France).

ISBN 92-5-203451-X ISSN 1020-0649



9 789252 034513

M-57

T1765F/2/9.99/300