

La gestion durable des eaux et la restauration de la productivité des sols sur des pentes fortes densément peuplées

POUR UNE AGRICULTURE TROPICALE RAISONNÉE

Synthèse de 58 années de recherches



**Par Eric Roose, éditeur scientifique
Avec la participation de 25
coauteurs**

Montpellier, Mai 2023

**La gestion durable des eaux et la
restauration de la productivité des sols
sur des pentes fortes densément peuplées**

**POUR UNE AGRICULTURE TROPICALE
RAISONNEE**

Synthèse de 58 années de recherches

Par Eric Roose , éditeur scientifique

Avec la participation de 25 coauteurs

Montpellier, Mai 2023



Sommaire

I. Première partie : essai de synthèse des publications de Roose sur la GCES (1964-2017) (E.Roose)

Avant-propos : le cheminement d'un chercheur.....	7
1. Introduction : la forêt, modèle de développement durable.....	11
2. Définitions.....	19
3. Evolution des stratégies de lutte antiérosive.....	28
4. Les facteurs de l'érosion en nappe	47
5. L'érosion linéaire en rigole et ravines.....	63
6. L'érosion en masse.....	76
7. La dégradation de la productivité des sols tropicaux	84
8. Lixiviation des nutriments par les eaux de drainage.....	100
9. La restauration de la productivité des sols tropicaux	104
10. Conclusions	112

II. Deuxième partie : Etude de 22 cas en régions chaudes.....114

***11. Techniques traditionnelles et modernes de GCES au Rwanda.....114**

Ndayizygiye Fr., Nyamulinda V., Roose E.

***12. Efficacité et limites de l'agroforesterie pour restaurer une agriculture durable intensive au Rwanda.....129**

König D., Ndayizygiye Fr., Roose E.

***13. Des bananeraies pour la conservation des sols acides du KIRIMIRO (Burundi).....137**

Rishirumuhirwa Th., Duchaufour H., Roose E.

***14. Gestion de l'eau et de la fertilité des sols en pays bamiléké (NO Cameroun).....147**

Valet S., Fotsing J.M., Boli Z., Roose E.

***15. Potentiel d'une légumineuse de couverture (Mucuna pruriens) pour la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du sud Bénin....156**

Azontonde A., Barthès B., Blanchart E., Roose E.

***16. Quelques plantes utiles pour la conservation et la restauration des sols tropicaux164**

Klein H.D., Roose E., Peltier R.

***17. Capture du ruissellement et restauration de la productivité des sols du bassin de Gros Morne (Haïti)177**

Brochet M., Saintil Clossy, Lilin Ch., Roose E.

***18. Erosion et pollution sous cultures industrielles (bananes, ananas, canne à sucre) Restauration de sols volcaniques en Martinique.....188**

Khamsouk B., Roose E., Dorel M.

***19. Conservation des sols sur les hauts plateaux de Madagascar.....201**

Chabalier PF., Rakotomanana J.L., Razafindrakoto M.A.

***20. Des nouvelles de la lutte antiérosive en Ethiopie215**

Hurni H.

***21. Trois approches de la conservation des sols dans les Andes (Pérou, Equateur) en fonction des conditions socio-économiques224**

De Jaegher Ch., De Noni G., Roose E.

*** 22. Gestion durable des ressources dans le bassin de Taslyda, Haut Atlas, Maroc234**

Sabir M., Roose E.

Partie III. Résumé et conclusions générales ...(Roose).....253

Partie IV. Bibliographie principale de Eric Roose (1964-2022)269

Mots clés : Synthèse ; lutte antiérosive ; dégradation des sols ; restauration de la productivité des sols ; sols tropicaux et méditerranéens ; rôle des arbres, élevage, hommes.

Liste des figures

2.1. Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace : diversité des acteurs et des logiques (Roose, 1994).....	21
2.2. Le déséquilibre du milieu « aménagé » entraîne la dégradation des sols. Ensuite l'érosion l'accélère.	25
3.1. La pratique du Zaï au cours de la saison culturale en vue de la restauration de la productivité des sols et de la réhabilitation de la végétation (Roose, 1994).	41
4.1. Schéma des croûtes d'érosion, des croûtes structurales et des croûtes sédimentaires (d'après Valentin, 1981).....	48
4.2. Les indicateurs de l'érosion en nappe. (Roose, 1977).	50
4.3. L'érosion est fonction de la hauteur du couvert végétal au-dessus du sol (Wischmeier et Smith, 1978).	53
4.4. Facteur topographique en fonction de l'inclinaison et de la longueur de pente (Wischmeier et Smith, 1978).....	55
4.5. Nomographe permettant d'évaluer le facteur K d'érodibilité des sols en fonction du taux de MO, de la texture, de la structure et de la perméabilité (Wischmeier, Johnson et Cross, 1971).....	57
4.6. Orientation du billonnage en fonction de la pente du terrain et des risques de ravinement et glissement en masse (Roose, 1994).	59
5.1. Trois théories explicatives du ruissellement (Roose, 1994).	64
5.2. Trois processus de ravinement (Roose, 1994).	65
5.3. Le diagramme de Hjulström (Roose, 1994).	70
5.4. Différents types de seuils peu coûteux, souples et faciles à monter avec les matériaux locaux (Roose, 1994).	72
6.1. Diverses formes d'érosion en masse (Roose, 1994).....	78

6.2. Glissement rotationnel « en coup de cuillère » (Neboit, 1991).....	79
8.1. Schéma d'un lysimètre de sols non remaniés	102
8.2. Schéma d'une case ERLO	103
13.1. Carte des régions naturelles du Burundi et situation de la station de Mashitsi (Rishirumuhirwa, 2017)	132
13.2. Réponse du maïs à trois techniques de restauration des sols après trois années d'érosion d'intensité variable à la station de Mashitsi (Rishirumuhirwa, 2017).	142
18.1. Parcelle de mesure de l'érosion et du ruissellement adaptée aux tempêtes tropicales « sous bananeraie établie » en Martinique (Khamsouk, 2001).	189
18.2. Lysimètre cône disposé sous le réseau racinaire d'une touffe de bananier.	191

Liste des acronymes

AC = Agriculture de conservation (= CA en anglais)

CES = Conservation de l'eau et des sols (= SWC en anglais)

DRS = Défense et restauration des sols

GCES = Gestion conservatoire de l'eau et des sols (= land husbandry en anglais)

LAE = Lutte antiérosive

RTM = Restauration des terroirs de montagne

CIRAD = Centre International de recherches agronomiques pour le développement

IRD = Institut de recherches pour le développement

ORSTOM = Office de recherches scientifiques et techniques Outre Mer

ISCO = International soil conservation organization

FAO = Food and agriculture organization of ONU

ICRAF = International center of research on agro-forestry

USLE = Universal soil loss équation

Zaï = technique traditionnelle complexe de restauration des sols dégradés par érosion en zone soudano-sahélienne (du Mali à Madagascar)

Waswac = World Association of Soil and Water Conservation

Key words : synthesis, soil & water conservation, soil fertility restoration, tropical & mediterranean soils, impact of trees, animals and human

Summary : the authors measured experimentally sheet, gully & mass erosion in Africa & South America. They propose here a synthesis of the mains data on tropical soil degradation and restoration. The USLE values are presented which seems useful to preserve excessive erosion but not to increase the production at the rate of human densification. Then Roose spend time to analyse the traditionnal african systems to restore the soil fertility in order to propose a new approach of soil management taking into account the human habits (GCES or land husbandry in english) Eric ROOSE

Avant propos

Il m'est souvent arrivé, lorsque j'énonce mon métier de chercheur, qu'on me rétorque d'un air goguenard, « Ah oui, ceux qui cherchent longtemps, mais trouvent rarement » !

Hé bien oui, j'avoue que mon esprit curieux explore depuis plus de 60 ans un vaste sujet qui me passionne « l'érosion, la pauvreté et la faim dans le monde ». Cependant cet ouvrage de synthèse voudrait vous présenter quelques résultats importants pour le développement agricole durable que j'ai obtenus, non pas tout seul, mais avec la complicité de la communauté des chercheurs rencontrés lors des 150 congrès auxquels j'ai participé, des 25 thésards que j'ai encadrés dans une dizaine de pays lors des 236 missions commandées par l'ORSTOM-IRD, le CIRAD, la FAO, divers banques, l'équipe de mon unité de recherche IRD, et finalement les 700 participants du « Réseau Erosion francophone » réunis chaque année pendant 25 ans !

Mon histoire commence à l'âge de 12 ans à l'Institut St Louis de Bruxelles où la FAO a présenté un film sur « La faim dans le monde ». Moi qui ai connu les restrictions alimentaires pendant la guerre de 1940-45, j'ai ressenti ce message comme un appel...Et quand il m'a fallu choisir une orientation, j'ai choisi d'étudier l'Agronomie tropicale et les Eaux et Forêts à l'Université de Louvain (Belgique). Puis j'ai suivi la formation en Pédologie tropicale au Centre ORSTOM de Bondy, sous la direction de Georges Aubert (le père des pédologues français) et la lutte antiérosive auprès du géographe Frédéric Fournier.

En janvier 1964, je débarquais au Centre ORSTOM d'Abidjan, un peu groggy par la chaleur et la moiteur de la forêt équatoriale. Après 6 mois d'adaptation et de cartographie des sols de basse Côte d'Ivoire, je me suis consacré à mesurer les principaux processus pédologiques observables (érosion, lessivage des argiles et des nutriments, remontées biologiques par les vers de terre et les termites) sur les sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux entre Abidjan (forêt équatoriale, pluie > 2000 mm) et Ouagadougou (savane soudano-sahélienne, pluie 700 mm). Il en est résulté l'application à l'Afrique de l'Ouest du modèle USLE (universal soil loss equation) (Wischmeier et Smith, 1968), prévoyant le risque d'érosion en nappe et les moyens les plus efficaces pour la réduire à un niveau acceptable. En outre, j'ai mesuré en coopération avec le CIRAD, le bilan des solutés (dont les engrais) modifié par le défrichement et la mise en culture des terrains tropicaux. L'originalité du travail tient des méthodes expérimentales développées pour comparer le fonctionnement actuel de deux types de sols très anciens à géochimie voisine, mais dont les propriétés physiques sont très différentes aujourd'hui lorsqu'on les cultive. C'est en analysant les eaux de surface sur cinq niveaux et leurs charges en nutriments que j'ai pu suivre la dynamique actuelle de ces sols très anciens, un peu comme les médecins suivent l'état de leurs malades par l'analyse du sang et des urines de leurs patients.

En 1973, j'ai soutenu la première thèse de docteur ingénieur présentée à l'université d'Abidjan : elle synthétise les résultats de « 20 années de mesures de l'érosion et du ruissellement sur petites parcelles en Afrique occidentale francophone ». L'application du modèle USLE établissait clairement que le couvert végétal, les litières et les cultures intensives étaient plus efficaces que les terrassements pour réduire l'érosion à un niveau acceptable.

En 1980, j'ai soutenu ma thèse d'Etat sous la direction du professeur François Lelong, hydrogéologue de l'université d'Orléans : « Dynamique actuelle des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Transferts hydrologiques et biologiques de matières en milieux naturels ou cultivés ». Cette synthèse apporte des preuves chiffrées des effets de l'érosion et du drainage excessifs sur les pertes en nutriments à l'origine de la dégradation des sols tropicaux. En indiquant les techniques à favoriser pour réduire les risques d'érosion et les pertes des nutriments par drainage, elle ouvre la voie à l'agriculture tropicale intensive raisonnée.

De 1980 à 1997, j'ai développé une approche expérimentale de diagnostic des risques d'érosion en fonction des systèmes de cultures par des enquêtes (Algérie, encadrement INRF = institut national de recherches forestières) et par des tests au simulateur de pluies (encadrement de 5 thèses à Orléans). Au contact avec les paysans de France et d'Afrique, j'ai développé une nouvelle stratégie de lutte antiérosive, la Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES), une approche participative introduisant des innovations au

niveau des systèmes culturaux intensifs couvrant bien le sol... encadrement de thèses sur la GCES au Rwanda, Burundi, Burkina Faso, Cameroun, Mali, Cap Vert, Maroc, Martinique ...Publication d'une première synthèse sur la GCES dans le Bulletin Pédologique FAO N°70, 420 p. Il s'agit d'une approche positive de la gestion de l'eau et des sols par les paysans en vue d'une agriculture durable : suite à des enquêtes, améliorer les techniques traditionnelles de gestion de l'eau sur les pentes et compléter leurs connaissances par l'introduction d'essais de techniques modernes de gestion des engrais et d'intensification des cultures afin de couvrir le sol en permanence (comme sous forêt).

De 1997 à 2002, avec l'équipe du laboratoire LCSC de l'ORSTOM (comportement des sols cultivés), nous avons procédé à « l'évaluation des indicateurs de risque de ruissellement et d'érosion à différentes échelles, de l'agrégat au versant et au terroir » sur des terrains de grandes cultures (vigne, coton, maïs, ananas, canne à sucre, banane) en France, Maroc, Cameroun, Mali, Martinique. Impressionnés par les réalisations des paysans, nous avons consacré un colloque intitulé « Stratégies traditionnelles de gestion durable de l'eau et des sols en zones méditerranéennes » que nous avons publié dans le Bulletin du Réseau Erosion BRE n° 21, Ed. IRD, Montpellier, puis dans « Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides », 2008, ed. IRD, ENFI et Agence universitaire de la Francophonie, 402 p.

De 2002 à 2006, suite aux restructurations de l'IRD, j'ai participé aux activités de l'UR « Séquestration du carbone », organisé un congrès international « Land use, Erosion & carbon sequestration » et publié une synthèse « Erosion & carbon sequestration » dans la série « Advances in Soil Sciences » avec les spécialistes américains Lal et Stewart. Ces études ont montré que l'érosion et le lessivage du carbone organique est négligeable sous forêt ou sous cultures à litières complètes, mais atteint des valeurs de 50 à 2000 kg/ha/an sous culture couvrant mal le sol, soit autant que la capacité des sols sableux tropicaux à séquestrer du carbone par humification des litières.

Depuis ma retraite, j'ai consacré 12 années à rédiger trois synthèses, l'une pour encourager l'adaptation des méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et de la fertilité des sols au Maroc (éd. IRD), la seconde pour « réhabiliter les sols et les protéger contre les pluies exceptionnelles en Haïti » (éd. IRD, 2012) et la troisième « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie » (Ed IRD, 2017, 711 p.)

Il me restait un devoir : restituer les connaissances acquises sur les zones tropicales à forte population vivant sur des pentes raides (en particulier au Rwanda, Burundi, Madagascar, NO du Cameroun, Haïti, Cap Vert, Maroc, etc...).

J'ai profité du confinement imposé pour freiner l'extension du CORONA VIRUS, pour résumer les

principaux résultats acquis durant ma carrière concernant les processus de dégradation des sols et les facteurs les plus utiles pour lutter contre l'érosion et pour restaurer la productivité des sols.

J'ai hésité à présenter dans ce dernier ouvrage, ma vie de chercheur en Afrique sous forme d'un « Mémoire d'un chercheur combattant pour une agriculture tropicale durable ». Finalement, je garderai pour mes enfants le récit de mes aventures africaines et vais tenter de résumer les 350 publications ou tout au moins de sélectionner les résultats les plus importants sur la lutte contre l'érosion, la dégradation et la restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens, sujets qui touchent de nombreux domaines (les sols, l'agriculture, les arbres, les animaux, le bilan hydrique, la biomasse, l'humus, la séquestration du carbone... et les hommes), qui peuvent intéresser les enseignants, les chercheurs, les développeurs, en particulier des régions chaudes.

Ainsi, il ne faudra pas vous étonner de retrouver des extraits de mes nombreuses publications qui vous donneront l'occasion de relire quelques documents cités en référence, sur internet et sur la base documentaire HORIZON de l'IRD (Institut de recherche pour le développement).

Si on analyse ma démarche pendant 60 années de recherches expérimentales et d'enquêtes auprès des paysans, on aboutit à un projet d'agriculture tropicale raisonnée intégrant une approche biologique (diversité des cultures, légumineuses, haies vives, arbres, engrais organiques, etc), mais avec des compléments d'engrais minéraux et un minimum de pesticides pour maîtriser temporairement les adventices, les maladies et les insectes particulièrement virulents en régions chaudes et humides. Des recherches devraient s'organiser pour trouver des solutions les plus naturelles et économiques, compatibles avec l'intensification de la production agricole indispensable dans ces régions chaudes qui connaissent à nouveau des périodes de disettes.

Il me reste à remercier mes encadrants de l'ORSTOM, qui m'ont accordé leur confiance et laissé une grande liberté de développer des idées nouvelles glanées auprès des paysans africains et des chercheurs anglophones (en particulier le Dr. Chris Reij de Wageningen) qui m'ont encouragé dans mes expériences dans le domaine de la conservation des sols tropicaux, de la simulation de pluies et de la modélisation, ainsi que de l'analyse des techniques traditionnelles de conservation de l'eau et de restauration des sols développées en Afrique occidentale, dans les montagnes du Maghreb et de l'Afrique de l'Est (Bulletin FAO Pédologie n°70). Je remercie aussi les lecteurs qui m'ont aidé à corriger mon manuscrit, et en particulier le géographe Joseph de Bettignie qui connaît bien l'Afrique occidentale.

Introduction

La forêt comme modèle de développement durable

Par Eric Roose

1.1...Au cours de l'histoire, l'agriculture tropicale s'est développée au dépend des forêts et des savanes, sur des sols riches en matières organiques, enrichis en cendres et à peine travaillés superficiellement. A voir la biomasse accumulée par les forêts tropicales, on pourrait croire que ces sols sont très fertiles. En réalité la forêt se nourrit sobrement des suspensions dans l'air (N+C+poussières) et de ses restitutions (litière) ; elle réduit efficacement ses pertes de nutriments par érosion et drainage. Aussi après le brûlis et quelques années de culture, leur productivité a tellement baissé que les paysans les abandonnent à la jachère qui, en 5 à 30 ans, reconstitue sa fertilité en passant par trois stades, envahissement par des adventices exigeant pleine lumière, des arbres et arbustes « dominés » temporaires et finalement, des arbres « dominants » qui peuvent vivre centenaires .

Rapidement, « les forestiers » ont observé le rôle majeur des arbres sur l'érosion, le bilan hydrique des rivières, la reconstitution de la fertilité des sols cultivés par fixation de l'azote de l'air, la remontée des nutriments entraînés par le drainage ou libérés par l'altération des roches et la production d'une biomasse abondante capable de relever le taux d'humus du sol et de séquestrer le carbone. Le milieu forestier tempère le climat, y compris les phénomènes exceptionnels comme les pluies cévenoles sur le mont Aigoual, ou les tempêtes tropicales pouvant cumuler plus de 250 mm de pluies en 2 jours (voir les essais en Martinique). Des Parcs Nationaux ont été créés pour conserver la biodiversité du milieu naturel, la Restauration des Terrains de Montagne (RTM) pour reforester les montagnes surpâturées et la conservation de l'eau et des sols (CES) pour protéger les terres cultivées (Lilin, 1986). Enfin

autour du bassin méditerranéen, des agronomes ont créé la Défense et Restauration des sols (DRS), qui marie la mise en défens des montagnes et la gestion des eaux de ruissellement sur les terres cultivées.

En zone tropicale chaude et humide, tous les processus de dégradation des matières organiques (MO), érosion des sols et lixiviation des nutriments, sont accélérés : c'est donc une zone idéale pour étudier ces processus et les facteurs sur lesquels s'appuyer pour tester les moyens les plus efficaces pour réduire les pertes et restaurer la productivité des sols cultivables.

1.2....Mais en quoi les arbres peuvent-ils aider à la conservation et à la restauration de la fertilité des sols cultivés ? Dans les années 1980, l'ICRAF (institut de recherches en agroforesterie) a été chargé d'étudier les systèmes agro-forestiers d'Afrique et les mécanismes de restauration de la fertilité des sols. Les chercheurs ont décrit une grande diversité de systèmes conjuguant l'adaptation des espèces d'arbres au bioclimat avec les systèmes culturels des ethnies occupant l'espace :

- succession dans le temps des arbres et des cultures (taungya, jachères forestières) ;
- succession dans l'espace de haies vives et de bandes cultivées ;
- paysages de parcs constitués de 20 à 40 arbres par ha, produisant divers fruits ainsi qu'une litière importante et abritant une rotation de cultures (ex. arachides-céréales, coton-maïs, sous *Acacia albida*) ;
- caféières, cacaoyères ombragées sous divers arbres, souvent des légumineuses.

Les interactions des arbres avec les cultures, le sol et le micro-climat, sont nombreuses (Dupriez, de Leener, 1993). Ne retenons ici que l'impact des arbres sur la fertilité des sols et sa conservation ;

- **Sur le bilan hydrique et l'énergie.** Absorption d'une partie de l'énergie solaire par la canopée (modère la température maxi et mini), capture des brumes et d'une partie des pluies, dissipation de l'énergie des pluies surtout au niveau de

la litière, amélioration de l'infiltration des pluies et réduction du ruissellement (jusqu'à ce que le sol soit saturé), augmentation de l'évapotranspiration, réduction du drainage et étalement dans le temps de la restitution du drainage (étiage des rivières). Grâce à l'ombrage créé par la canopée, les arbres attirent le bétail qui y concentre ses déjections.

- **Sur le bilan chimique.** Les arbres stockent le carbone de l'air et restituent l'oxygène, stockent les nutriments puisés dans l'air (N + poussières), dans le drainage et dans la zone des roches altérées. Les arbres nourrissent la faune et la microflore qui restituent progressivement les nutriments à mesure que la litière est minéralisée ;

- L'abondant réseau racinaire stocke le carbone et les nutriments dans l'horizon humifère : l'humus augmente la capacité du sol à fixer les bases ; son réseau racinaire profond capte l'eau et les nutriments et maintient la biomasse verte, précieuse en particulier en saison sèche (fourrages) ;

- Sa litière (2 à 15 t/ha/an de feuilles, ramilles, fruits, animaux) protège la surface du sol de l'énergie des pluies, du ruissellement et de l'érosion, recycle les nutriments en nourrissant la faune et la microflore, favorise la circulation de l'eau et de l'air.

1.3...Comment définir un système de culture durable en s'inspirant du système forestier ?

* Diversifier les plantes cultivées : cultures associées dans l'espace, avec des arbres fertilitaires (en lignes ou en parc) pour mieux exploiter l'espace et réduire l'impact des nuisibles.

* Choisir des cultures produisant rapidement une biomasse abondante couvrant rapidement le sol avec un réseau racinaire exploitant différents horizons. Compléter la couverture végétale près du sol par la canopée des arbustes (haies vives) et des arbres (fruitiers, fourragers, fertilitaires).

* Couvrir les interlignes avec des plantes de couverture ou des cultures décalées dans le temps. Valoriser les adventices comme paillage dans les interlignes ;

* Préserver la microflore et la faune du sol en limitant le travail du sol au minimum (pour enfouir les engrais et semer en ligne) et en protégeant la surface par une litière permanente ;

* Réduire les pertes par érosion (couverture complète du sol) et par drainage (cultures intensives et associées à des arbres) : réserver une part des résidus de culture pour entretenir l'humus et la vie microbologique du sol.

1.4...Cette approche agroforestière est voisine de plusieurs tentatives pour développer des systèmes de cultures durables et intensifs :

****l'agriculture de conservation*** (CA) cherche à éviter au niveau des champs cultivés l'exposition du sol nu aux pluies intensives en réduisant le travail du sol, en alternant céréales et légumineuses, en semant dans les résidus des cultures précédentes (zéro- ou mini-tillage) ;

****l'agriculture biologique*** cherche à restaurer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol en refusant tout usage d'engrais et pesticides chimiques (excepté le chaulage, la dolomie, les phosphates calcaires broyés, le soufre et la bouillie bordelaise, etc). Les pullulations d'insectes et autres nuisibles devraient être maîtrisées progressivement par la diversité des cultures (associations, rotations, utilisation de parasites) et l'utilisation de décoctions, purins répulsifs et diverses plantes auxiliaires. La fertilité du sol est assurée par l'apport de compost, fumier, purins et paillages. Cette « conversion au bio » entraîne une baisse de la production, une augmentation du travail et des prix de revient, mais une réduction des pesticides dans les produits au bout de 2 à 5 ans et l'amélioration de la santé du sol.

****La permaculture*** (Mollison, 1970) prétend offrir une approche écologique de l'agriculture s'appuyant sur la nature, réduisant la consommation d'énergie , favorisant la biodiversité et les interactions entre espèces cultivées, protégeant les sols et produisant une abondance naturelle permettant l'autosuffisance

alimentaire. Théoriquement cette approche peut s'adapter à toutes les échelles d'espace, mais plus spécialement dans les jardins potagers (Mayo, 2014). Cette approche a vite évolué en philosophie de la vie qui a intégré des éléments de la pensée taoïste (Masanobu Fukuoka, dans Mayo, 2014) :

- *observer et s'adapter aux situations locales pour en tirer le meilleur parti ;
- *faire avec, plutôt que s'opposer aux forces de la nature : ex. choisir des plantes résistantes à la sécheresse plutôt que d'arroser sans cesse ;
- *stocker l'eau, l'énergie solaire et les déchets végétaux pour les valoriser plus tard (compostière) ;
- *créer des systèmes efficaces à haut niveau de production ;
- *transformer les déchets en services gratuits: ex. escargots=nourriture des poules ;
- *promouvoir la coopération plutôt que la compétition, créer des liens (ex. légumineuses et céréales) ;
- *valoriser la diversité des espèces plutôt que la monoculture très vulnérable.

La permaculture fait l'apologie de la lenteur, de l'évolution permanente et des initiatives locales (son jardin), de la valorisation des bordures et interfaces.

La **GCES** (gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et des sols, ou Land husbandry en anglais) et les autres approches sont nées autour des années 1970-80 de la critique de la Conservation des sols (Roose, 1994) qui a abouti à l'échec de 75% des projets de développement contenant un important chapitre de lutte antiérosive (Hudson, 1991). En effet, les chercheurs ont démontré que la conservation des sols déjà dégradés réduisait généralement l'érosion en nappe, mais n'améliorait ni les sols ni surtout la production végétale, alors qu'elle exige beaucoup de travail.

1.5. Beaucoup des principes de permaculture se retrouvent dans la GCES mais cette dernière approche, en plus des autres, inclut la gestion de tout un bassin versant et s'appuie sur la nécessité de compléter la fertilisation organique par

des compléments minéraux (surtout P, K et N et microéléments) et un minimum de pesticides pour lutter contre les maladies. En effet dans les milieux tropicaux et méditerranéens testés, la production de déchets organiques dépasse rarement 10 t/ha/an, ce qui permet de fertiliser correctement 1/3 des champs cultivés. Il faut donc, soit déplacer la biomasse produite ailleurs, soit apporter des compléments minéraux beaucoup plus légers et faciles à déplacer. La GCES réintroduit aussi la biodiversité au sein des champs: cultures associées (haricots s'appuyant sur les tiges de maïs, apportant une partie de l'azote nécessaire et couvrant le sol des interlignes) mais aussi à l'échelle du versant (haies vives, bandes d'arrêt, terrasses progressives, parc de légumineuses et autres arbres utiles).

1.6. Par contre, certaines idées contenues dans ce résumé de 60 ans de recherche, ne suivent pas les thèses/scénarios à la mode...(bio exclusif), basés sur des expériences paysannes mais bien peu scientifiques. Nous pensons que dans le « balancement des vérités scientifiques temporaires »...(des agricultures traditionnelles à la révolution verte, puis retour à l'agro BIO, Révolution 2 fois Verte à la permaculture), il est bon de rappeler des expériences qui visent à chiffrer les effets des scénarios proposés (coût, évolution du sol, production, travail, avantages et limites) en milieux tropicaux variés où les processus pédologiques sont généralement beaucoup plus rapides qu'en milieux tempérés. Si la GCES propose des principes très proches de la permaculture (en particulier gérer la nature plutôt que de s'y opposer), les conclusions de nos essais de bilans chimiques en des milieux tropicaux très variés confirment qu'il faut profiter au max. des moyens biologiques (gestion de la biomasse, vers de terre, etc), mais, pour surmonter les carences des sols dégradés et atteindre des rendements optima nécessaires pour nourrir la population mondiale, il faut s'appuyer sur des compléments minéraux ; et l'intervention, la plus réduite possible, des herbicides et pesticides : d'où le titre « agriculture tropicale raisonnée ».

N'oublions pas trop vite les résultats de Liebig qui démontrent que les plantes ne se nourrissent pas directement de molécules biologiques, mais seulement après minéralisation par la microflore. Et si les engrais et pesticides industriels ont évidemment des effets pervers (acidification, pollution), ils tiennent plus au mauvais usage de ces produits industriels qu'à la nature de ces produits qui s'avèrent souvent extrêmement efficaces lorsqu'ils sont utilisés à la bonne dose et au bon moment. Que la recherche continue de tester des molécules moins dangereuses et aussi efficaces aux doses homéopathiques !

1.7...Contenu de cet ouvrage de synthèse. Arrivé au bout de ma longue carrière de recherches sur l'érosion et la restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens, il m'a semblé utile de condenser les principaux résultats sélectionnés parmi une abondante liste de publications pour donner aux jeunes chercheurs une idée claire du

cheminement des chercheurs au sein de l'ISCO (International Soil Conservation Organisation), de la FAO et du Réseau Erosion Francophone. Cet ouvrage délivre également une liste bibliographique où ils pourront puiser les données de base qui soutendent les principes et conclusions ici rassemblées.

Persuadé suite à mes nombreuses missions dans 72 pays qu'aucune technique de lutte antiérosive n'est universelle, j'ai déjà publié une synthèse sur les principes de la GCES (FAO, 1994), sur la GCES dans les zones semi-arides (Cah. ORSTOM Pédol., 22,2, 1993), sur la valorisation des techniques traditionnelles en milieux méditerranéens (Roose, Sabir, Laouina, ORSTOM, 2010), sur les zones tropicales sujettes aux pluies cycloniques (BRE/IRD, Haiti, 2012) et sur la restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens (Editions IRD, 2017). Il me restait à traiter de la GCES dans les zones tropicales de montagnes ou collines à fortes pentes et population dense : c'est l'objet de la première partie de cet ouvrage. Enfin, pour remercier mes amis, collègues et thésards et démontrer que ces idées sont nées d'une franche coopération sur le terrain, je leur ai donné l'occasion de publier une brève étude de cas d'intervention réussie pour améliorer la gestion durable de l'eau, des sols et le niveau de vie des paysans dans des milieux très divers du point de vue humain et physique.

Bibliographie

Dupriez H., De Leener Ph., 1993. Arbres et agricultures multiétagées d'Afrique. Edition Terres et Vie, CTA, 280 p.

Hudson N.W., 1991. A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects. FAO Soils Bulletin N°64, Rome : 65 p.

Lilin Ch., 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19ème siècle. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22, 2 : 139-146.

Mayo C., 2014. Le guide de la permaculture au jardin. Pour une abondance naturelle. Edit. Terre Vivante, Mens, France, 189 p.

Mollison B., 2012. Introduction à la permaculture. Edit Passerelle Eco.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES, nouvelle stratégie de la lutte antiérosive. Bull. FAO Pédologique N°70, Rome, 420 p.

Roose E., Sabir M., Laouina A., 2010. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Editions Marseille, 343 p.

Roose E., Denoni G., Duchaufour H., 2012. Protection et restauration des sols dans les zones à pluies cycloniques. Colloque Haiti.Ed. IRD, Montpellier, 700 p. Roose

E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie. IRD Editions, Marseille, 711 p.

Chap. 2. Définitions

Les problèmes de dégradation des sols sont souvent liés au développement des populations : ils concernent les agronomes et forestiers, les hydrologues et sédimentologues, les géographes et géologues, mais aussi les démographes, les socio-économistes, les ethnologues et les politiciens. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas toujours la même portée selon les disciplines. Il nous faut donc préciser le sens que nous leur prêtons dans cet ouvrage, celui d'un agro-pédologue ayant une longue expérience de terrain.

Un sol est le fruit d'une longue période d'altération chimique, de fragmentation physique et biologique des roches mères et des apports par colluvionnement et alluvionnement. Ce matériau évolue sous l'influence des pluies, de la température et des agents biologiques pour former des argiles, de l'humus et des horizons caractéristiques de chaque type de sol. Une toposéquence comporte une succession de sols tout au long de la pente : il s'agit de couvertures pédologiques évoluant au cours des siècles plutôt que d'individus caractérisés par leur potentiel génétique.

L'érosion vient du terme latin « erodere » qui signifie « ronger, griffer ». 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 » : par exemple les montagnes méditerranéennes décharnées suite aux défrichements et aux incendies répétées des garrigues. En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de « denudation rate » des géographes anglais), mais en même temps l'érosion engraisse les vallées et les deltas qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas souhaitable d'arrêter toute l'érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable. De plus l'érosion peut avoir un rôle positif en évacuant les matériaux stériles des vieux paysages, suite à une très longue histoire de lessivage des solutés des sols et d'acidification par les acides humiques, les techniques culturales et les pluies acides. Nous traiterons surtout dans cet ouvrage de l'érosion hydrique en nappe et du ravinement, en particulier de l'érosion débutante causée par les mauvaises techniques de culture.

La tolérance dans le domaine de l'érosion a d'abord été définie comme la perte en terre arable en équilibre avec la formation des sols 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 arables. Mais les agronomes se sont vite rendu compte que la productivité des horizons humifères, riches en éléments biogènes, est bien supérieure à celle des roches pourries quasi stériles. De plus

l'érosion hydrique décape sélectivement les matières organiques (MO), les particules argileuses et les nutriments qui font la fertilité des champs.

On a donc tenté de définir la tolérance comme l'érosion qui n'entraîne pas de baisse sensible de la productivité des terres. Mais la productivité des sols dépend de la façon dont on l'exploite ! Et certains sols profonds comme les loess peuvent subir des pertes en terre importantes sur les versants sans qu'on n'observe de réduction sensible de la production, mais par contre provoquent des dégâts intolérables en aval par la pollution des eaux et l'envasement des retenues, des canaux et des ports.

Il faut donc tenir compte de trois aspects : la vitesse de restauration des sols, le maintien de la fertilité des terres et le respect de l'environnement et de la qualité des eaux (Mannering, 1981).

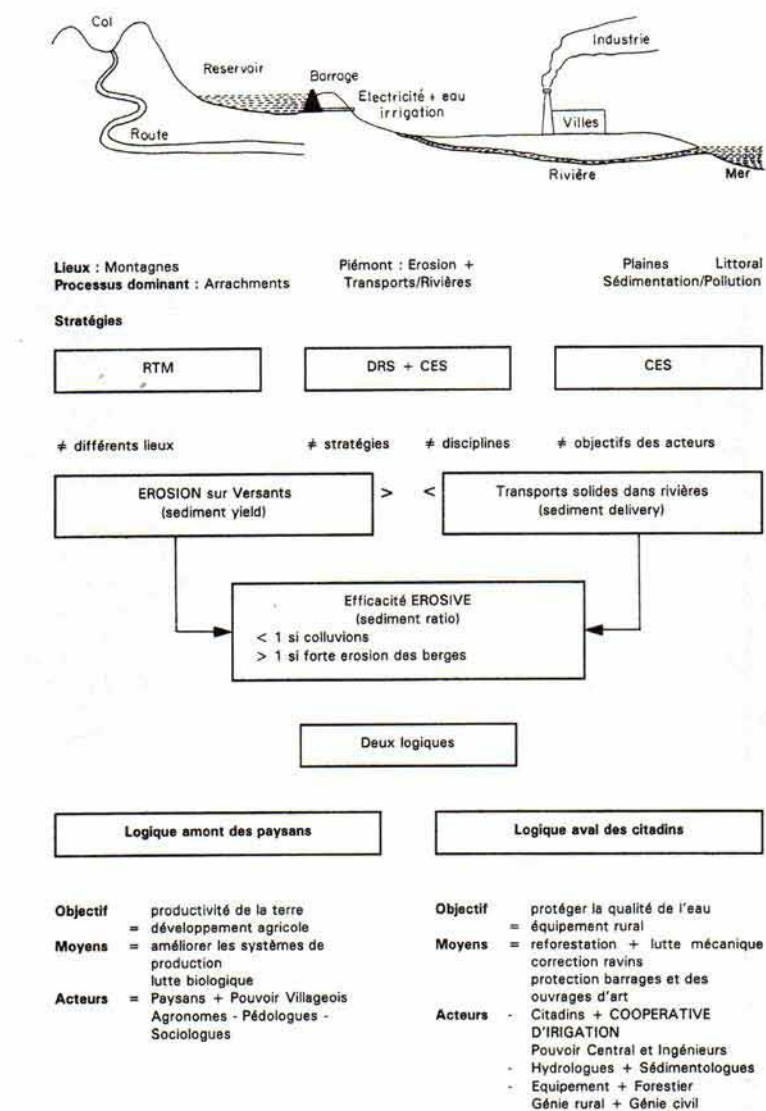
La discontinuité de l'érosion dans l'espace entraîne les activités de divers acteurs et de deux logiques. (Fig. 2.1.)

L'érosion résulte de nombreux processus et facteurs qui jouent au niveau de trois phases : le détachement des particules agrégées, le transport solide et la sédimentation. Quelle que soit l'échelle d'étude, on retrouve ces trois phases, mais avec des intensités d'érosion différentes : d'où la diversité des acteurs en fonction des phases dominantes.

En montagne, lorsque la végétation est détruite, les ravins, les torrents et les glissements de terrain entraînent d'énormes dégâts au réseau routier : les forestiers et les ingénieurs des Ponts et Chaussées interviennent pour entretenir les routes, revégétaliser les versants et corriger les torrents. Les populations rurales cherchent avant tout à gérer l'eau et les nutriments sur les prairies ou les terrasses irriguées pour stocker le fourrage pour l'hivernage plutôt que de lutter contre l'érosion. Dans les piémonts, les pentes sont encore fortes et l'érosion se manifeste lors du ravinement des torrents qui charrient une énorme charge en cailloux. Les forestiers tenteront de réduire les problèmes d'envasement des barrages par la RTM ou DRS (voir plus loin). Enfin dans les plaines, il s'agit d'avantage de l'alluvionnement des canaux, rivières et ports, de l'inondation des vallées et des quartiers résidentiels mal placés, de l'érosion des rivages par les courants marins.

Face à la diversité des problèmes liés à l'érosion, les acteurs de la dégradation des sols et les services de lutte antiérosive ont des objectifs et des stratégies différentes en fonction de leurs intérêts. Sur les parcelles paysannes et les versants, les gestionnaires des terres parlent de « pertes en terre » (sediment yield). Dans les rivières, les hydrologues parlent de transport solide (sediment delivery), en suspension (argile, limons et MO= MES) et transport de fond (sables et galets en charriage). Il y a généralement de grandes différences entre l'érosion au bas d'un champ et dans la rivière (sediment ratio = efficacité

Figure 2.1. Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace : diversité des acteurs et des logiques (Roose 1994)



de l'érosion). Parce que certains sédiments trop lourds se déposent en chemin (colluvions et alluvions), les transports solides spécifiques diminuent à mesure que le bassin versant s'agrandit. En zone tempérée, Ouvry et al., (1990) ont montré que sur les limons battants du bassin parisien, l'érosion ne devient inquiétante que lorsque sont réunies diverses conditions favorables : faible couvert végétal, sol encroûté, période humide prolongée, grandes parcelles remembrées. Par contre, en région méditerranéenne montagneuse, les pertes en terre sur les champs cultivés sur pente forte (20 à 40 %) peuvent être faibles (0,1 à 25 t/ha/an) tandis que les transports solides dépassent 100 à 200 t/ha/an dans les ravines et les oueds. Plus les débits de pointe sont importants, plus le ruissellement agresse les berges des oueds, ravine les basses terrasses et déséquilibre la base des collines voisines (Heusch, 1973 ; Arabi et Roose, 1989).

D'où deux logiques : les ingénieurs chargés de l'entretien du réseau routier et des rivières vont concentrer leurs moyens sur de grands chantiers de restauration des forêts (sols perméables), de terrassement des versants cultivés, d'aménagement des ravins et des rivières (DRS= défense et restauration des sols, voir plus loin). Les paysans par contre modifient leurs systèmes de production pour optimiser le bilan hydrique et la productivité de la terre et du travail. Ils rechignent à entretenir les banquettes et autres terrassements qui « consomment de l'espace et n'améliorent pas le rendement de leur propriété ».

La variabilité de l'érosion dans le temps.

*Les géographes distinguent généralement **l'érosion normale ou géologique** qui façonne lentement les versants ($E = 0,1$ à 1 t/ha/an) (= morphogenèse) tout en développant une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place et des apports colluviaux ou alluviaux. Cependant, il existe des zones à soulèvements orogéniques paroxysmiques où les débits solides peuvent atteindre 50 à 100 t/ha/an dans les Andes et dans l'Himalaya qui se soulève de un cm par an ou dans les zones tropicales exposées aux cyclones qui peuvent agir de façon soudaine et catastrophique à l'occasion d'événements rares, d'une succession d'averses ou d'activités volcaniques. En Colombie en 1988, les pluies tropicales ont déclenché des coulées boueuses sur le volcan qui en une seule nuit ont rayé de la carte une ville de 25 000 habitants (Nevado del Ruiz). Contre ce type d'érosion géologique, il est très difficile de lutter, sinon de cartographier ces zones et d'y interdire toute construction permanente. En France, l'état déclare la catastrophe naturelle et contraint les assurances à rembourser le coût des dégâts aux assurés.

***L'érosion accélérée par l'homme**, suite à une exploitation imprudente du milieu, est 10 à 1000 fois plus rapide que l'érosion normale. Il suffit d'une perte en terre de 12 t/ha/an

pour dépasser la vitesse d'altération des roches dures (20 à 100 000 ans pour altérer 1 m de granit en région tropicale humide selon Leneuf, 1965). La couche arable du sol s'appauvrit en argile et limons par **érosion sélective** (squelettisation du sol) et s'amincit (**décapage**) tandis que le ruissellement s'accélère (20 à 50 fois plus de ruissellement sous cultures sarclées que sous forêt tropicale) provoquant à l'aval des **débits de pointe** dangereux dans le réseau hydrographique (Roose, 1973). La **charge solide** d'un fleuve est le poids de particules en suspension dans les eaux. La **compétence** d'un fluide en mouvement est le diamètre maximal des particules transportées en fonction de la vitesse du fluide. La **capacité** d'un fluide est la masse de particules que le fluide est capable de transporter.

***La dégradation d'un sol** est la perte d'une ou plusieurs de ses propriétés physiques, chimiques ou biologiques. Elle ne concerne que la déstabilisation de sa structure et de sa macroporosité sans transport des particules à longue distance. Elle peut avoir diverses origines : salinisation, acidification par lessivage des bases, compaction par la motorisation, engorgement hydraulique, minéralisation des matières organiques et squelettisation par érosion sélective. En zone tropicale humide la dégradation des sols provient essentiellement de trois processus :

- **La minéralisation des matières organiques du sol** : elle est d'autant plus rapide que le climat est chaud et humide, que le travail du sol apporte de l'oxygène au niveau des racines et qu'on exporte toute la biomasse produite par les cultures sans compensation par la fumure ou le paillage. Arrivée à un certain seuil, l'activité de la micro et macro faune du sol diminue et la structure s'effondre.
- **L'acidification**, la perte des cations (calcium, magnésium, potassium et sodium), par érosion, par lixiviation par les eaux de ruissellement ou de drainage et par l'exportation de la biomasse, peut entraîner la perte d'assimilabilité des engrais (phosphates) ou la toxicité de l'aluminium, réduisant la croissance des cultures (et en particulier des précieuses légumineuses).
- **La squelettisation** : enrichissement en sables et appauvrissement en argile des horizons de surface par érosion sélective des particules fines, des matières organiques et nutriments, suite à la battance des pluies qui tassent le sol, cassent les agrégats, projettent alentour les particules. Ces pluies forment des pellicules de battance ou des croûtes de sédimentation qui réduisent drastiquement l'infiltration.

Sous les forêts tropicales denses, les sols sont bien protégés des énergies solaires et pluviales. D'une part, la canopée (850 t de biomasse) tempère les écarts de température et d'autre part, le sous-étage et la litière (9 à 15 t/ha/an de M.O. redistribuée toute l'année) nourrissent la mésofaune et recyclent rapidement les nutriments concentrés dans les feuilles

et les rameaux. Les racines sont très abondantes dans l'horizon humifère et limitent les pertes en nutriments par drainage et ruissellement. Quelques racines s'enfoncent à grande profondeur et procurent 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 entraîne la formation de sols homogènes et profonds, plus acides en surface qu'en profondeur. La vigueur de la forêt peut faire illusion quant à la fertilité des sols (ferrallitiques). En réalité la forêt tropicale recycle perpétuellement ses résidus et récupèrent en profondeur les nutriments entraînés par les eaux de drainage ou libérés par l'altération profonde des roches : c'est la remontée biologique (Roose, 1980).

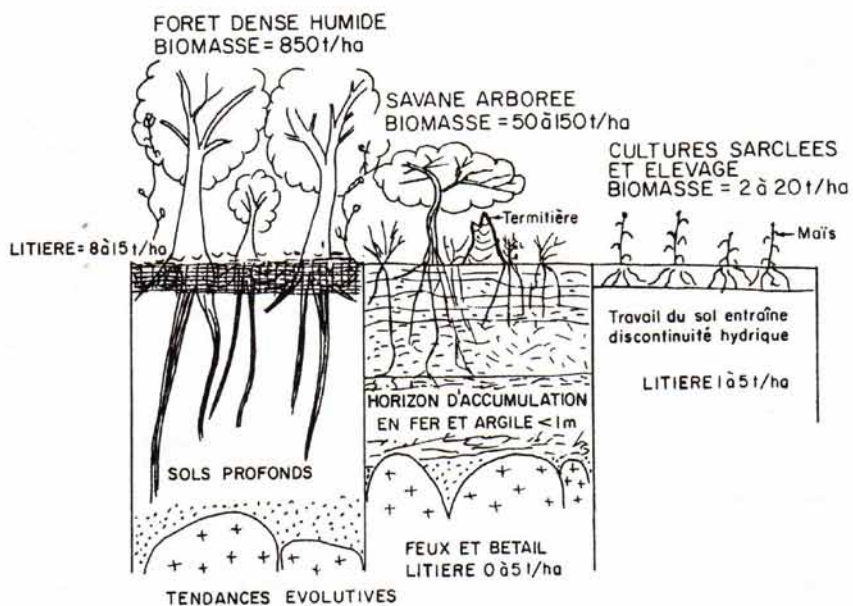
Les savanes compensent nettement moins bien les variations d'énergie. La biomasse (10 à 100 t/ha) est beaucoup moins importante et la litière (2 à 8 t/ha/an) brûle au passage fréquent des feux de brousse, laissant le sol nu affronter les premiers orages brefs mais très agressifs. Il en résulte un ruissellement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

Sous culture, après défrichage, on observe une simplification de l'écosystème : on passe de plus de 200 espèces d'arbres / ha sous forêt tropicale, à moins de 25 sous savane et 2 à 4 plantes en cultures associées). La biomasse (1 à 8 t/ha) diminue ainsi que l'enracinement souvent gêné par les techniques culturales (croûtes de battance et semelles de labour). La couverture végétale est réduite durant le cycle de culture (4 à 6 mois) et protège mal le sol contre le soleil (les températures extrêmes augmentent) et contre la battance des pluies (croûtes et ruissellement). Au niveau du sol, le climat est plus chaud et plus sec sous culture et l'énergie est moins bien amortie (sauf si paillage).

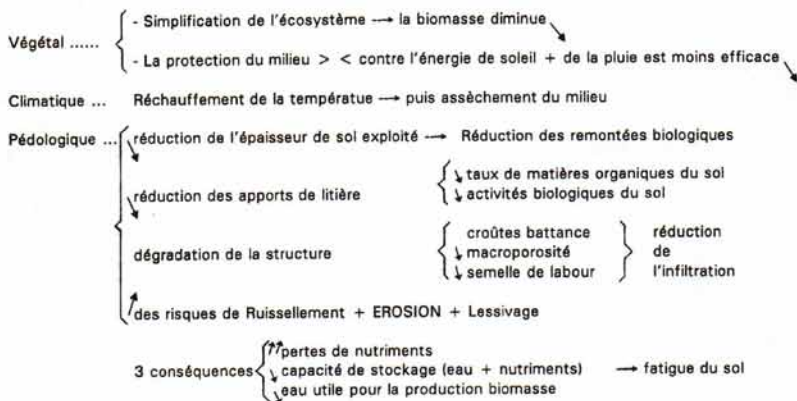
Les fuites de nutriments s'accroissent, les apports diminuent, la fertilité chimique et physique s'effondre après 4 à 10 ans de culture intensive. On connaît de nombreux exemples d'échecs de projets de cultures modernes comme celui de la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux en Casamance (Sénégal) vers les années 1950 (Charreau, Fauck, Thomann, 1970 ; Roose, 1967).

Le ruissellement et l'érosion apparaissent 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 (10 à 30 ans), soit par six interventions : des structures pour gérer l'eau (cordons de pierres ou haies vives, etc), rétablir la macroporosité (travail du sol), revivifier le sol par l'apport de MO fermentées (fumier, compost), corriger l'acidité (chaulage), nourrir continuellement la plante cultivée et développer un système de production favorisant une abondante biomasse couvrant le mieux possible le sol (paillage, plantes de couverture et cultures associées, engrais) (Roose, 2017).

FIGURE 2
 Nature des problèmes : le déséquilibre du milieu "aménagé" entraîne la dégradation des sols, puis l'érosion l'accélère



Au point de vue



Les termes du bilan hydrique

La pluie et les apports occultes (la rosée et les brumes apportent 30 à 150 mm par an) varient beaucoup dans l'espace en fonction de la structure des arbres, de l'altitude, de la distance à la mer, de l'orientation des versants par rapport aux vents humides dominants.

Le drainage est la fraction des pluies qui s'infiltrer dans le sol, complète le stock d'eau retenu par les micropores du sol et finit par rejoindre la nappe à la faveur des macropores qui permettent la circulation rapide de l'eau et de l'air dans les sols. Il faut 10 mm de pluie pour mouiller 10 cm de sable, 100 mm pour mouiller cent cm de sol argilo-sableux (ferrallitique) et 400 mm pour mouiller un mètre d'argile gonflante (vertisols).

L'évapotranspiration est la fraction des eaux de drainage que les plantes récupèrent dans le sol pour assurer le transport des nutriments et l'ouverture des pores des feuilles pour assurer la synthèse chlorophyllienne.

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 qui rejoignent rapidement la rivière où il provoque des débits de crue élevés après des temps de réponse de l'ordre d'une demi-heure pour des petits bassins d'un km².

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

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

Conclusions

L'érosion en nappe comporte un ensemble de processus variables dans le temps et dans l'espace, en fonction des conditions écologiques et de la gestion de la terre par les hommes.

La lutte antiérosive intéresse divers acteurs dont les intérêts ne sont pas forcément compatibles. Il va donc falloir choisir pour chaque situation les objectifs prioritaires des projets de lutte antiérosive, les méthodes les plus efficaces soit pour conserver ou restaurer 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.

Bibliographie

Arabi M., Roose E., 1989. Influences de quatre systèmes de production en région méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bull. Réseau Erosion ORSTOM*, Montpellier 9 : 39-51.

Heusch B., 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative dans les collines marneuses du Pré-Rif Occidental, Maroc. *Ann.Recherches Forestières au Maroc*, 12 : 9-176.

Leneuf N., 1959. L'altération des granites calco-alcalins en Côte d'Ivoire forestière : les sols dérivés. Thèse Fac. Sciences de Paris, 210 p.

Mannering J.V., 1981. The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. ISCO II, Morgan eds.Wiley : 337-350.

Roose E., 1967. Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Trop.*, 22, 2 : 123-152.

Roose E., 1973. Dix-sept années de mesures de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire. Thèse Doc.Ing. Fac. Sciences, Abidjan, ORSTOM n° 20, 125 p.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 420 p.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agropédologie. IRD Editions, Marseille : 711 p.

Chapitre 3. Evolution des stratégies de lutte antiérosive

3.1. Introduction : le développement agricole entraîne une augmentation des risques d'érosion.

Dans le monde, la population ne cesse d'augmenter, en particulier dans les pays en voie de développement, la plupart situés dans les régions tropicales. Elle pourrait atteindre 11 milliards de personnes en 2100. Pourtant la FAO estime que l'on dispose de techniques modernes capables de nourrir toute la population du monde : mais aujourd'hui, plus de 900 millions d'humains souffrent de sous-alimentation. Or 80 % des populations malnutries sont de petits agriculteurs. Les causes de pénuries de nourriture sont multiples : les guerres, les catastrophes naturelles, la sécheresse, le désengagement des gouvernements vis-à-vis du monde rural, la pauvreté des paysans et l'augmentation du prix des intrants, en particulier des engrais minéraux, mais aussi la pression foncière des états et des multinationales qui dépouillent les petits paysans de leurs droits à la terre (Ziegler, 2012).

A ces causes s'ajoutent la pression démographique qui entraîne le surpâturage, l'extension des cultures à des sols fragiles et la dégradation des terres cultivées : l'érosion sélective, le lessivage des nutriments par le drainage, la minéralisation de l'humus et les exportations par les récoltes ne sont jamais compensées par des apports suffisants de biomasse et de nutriments.

Le projet GLASOD (Oldeman et al., 1990) conclut qu'en Afrique 24,5 % des terres sont dégradées. En Afrique sèche, les zones arides (48%) sont plus dégradées que les zones subhumides (26%) : l'érosion éolienne (20%) est plus importante que l'érosion hydrique (15%), la dégradation chimique (3,3%) et physique (1%). Les principales causes sont le surpâturage (58%), les cultures (18%), la surexploitation (17%) et la déforestation (6,6%).

3.2. L'impact de la densité de la population sur la dégradation des sols.

La plupart des auteurs pensent que, plus la densité de la population et du cheptel augmente, plus l'érosion et la dégradation des sols s'accroissent (Pieri, 1989). Ceci s'avère exact pour les systèmes de culture extensifs où il faut suffisamment de temps pour que la jachère restaure les principales propriétés du sol en relation avec la production végétale. Par contre, lorsque les terres aménagées sont abandonnées, on constate souvent une érosion croissante. Mais d'autres chercheurs ont observé que, sur des terres très densément peuplées comme le Kenya (Tiften et al., 1994), le Cameroun (Fotsing, 1993) et Madagascar (Boisseau et al., 1999), l'érosion reste négligeable. « Plus il y a de travailleurs, moins il y a

d'érosion car plus la terre est fumée, nettoyée de ses adventices et des ravageurs ».

En Afrique occidentale, Roose (1994) a observé des crises environnementales contraignant la population à choisir entre l'émigration ou la modification des systèmes traditionnels légués par les ancêtres. On assiste alors à une alternance de crises et de périodes stables, où se succèdent des systèmes de production adaptés à chaque situation foncière (fig. 4 de FAO p.24). En zone soudano-sahélienne, dès que la population dépasse 40 à 100 habitants /km², le temps de jachère diminue et n'est plus efficace : les adultes sont alors obligés de migrer en saison sèche vers des zones plus humides pour trouver un complément de ressources pour nourrir leur famille. Les paysans du Yatenga (Burkina Faso) acceptent d'investir 30 à 100 jours de travail par famille pour installer des structures antiérosives simples qui leur permettent de mieux gérer les eaux de pluie et la fertilité de leurs parcelles : cordons de pierres, d'arbres et de graminées, reconstitution des parcours et des parcs arborés (Roose, Dugué et Rodriguez, 1992).

Dans des zones volcaniques tropicales plus humides (Cameroun, Rwanda ou Burundi) on ne parle de forte densité qu'au delà de 250 à 750 hab/km², possible à condition d'intensifier le système de production (cultures associées, gestion des animaux en stabulation, introduction des arbres, recyclage rapide de tous les résidus et arrêt de l'hémorragie des nutriments par l'érosion et le drainage).

3.3. Les stratégies traditionnelles de lutte antiérosive

Depuis 7000 ans, l'homme a accumulé des traces de sa lutte contre l'érosion en vue d'améliorer la gestion de l'eau et de la fertilité des sols qu'il cultive (Louwdermilk, 1953). On constate que les méthodes traditionnelles sont liées aux conditions climatiques et socio-économiques.

La culture itinérante (shifting cultivation) est la plus ancienne stratégie utilisée sur tous les continents où la population est peu dense. Après défrichage, on cultive superficiellement sur les cendres et on abandonne la parcelle dès qu'elle ne produit plus assez pour le travail fourni (envahissement par les adventices et carence des nutriments assimilables). Pour que le système reste équilibré, il faut disposer d'une réserve considérable de terre (environ 20 fois la surface cultivée). Si la population augmente, la durée de la jachère diminue et le sol se dégrade progressivement en 4 ans sur sols sableux et en dix ans s'ils sont plus argileux. Cette stratégie peut être bien adaptée dans les zones peu peuplées, sur des sols profonds recevant plus de 600 mm de pluie par an.

A l'opposé, **les gradins en courbes de niveaux (bench terracing) ou les terrasses méditerranéennes irriguées** apparaissent dès que la population est dense, que la surface cultivable est rare (en montagne), et que le travail manuel est bon marché. Ces stratégies qui demandent 600 à 1500 jours de travail pour construire et entretenir ces structures sur des

pentres raides (30 à 60 %), 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 exister (guerre ou pression religieuse et foncière) ou pour produire des cultures rentables. C'est le cas des Kirdis du Nord Cameroun résistant à l'emprise de l'islam, ou encore des INCAS du Pérou dans la région de Machu Pichu qui, au XVème siècle ont construit des terrasses en gradins remarquables pour se défendre des indiens amazoniens, puis des espagnols, et ramener les eaux de fonte des glaciers (> 3500 m) aux zones favorables au maïs (<2000 m) (Roose, 1994).

Grâce **aux gros billons, aux cultures associées, à l'élevage et l'agroforesterie**, les Bamiléké du NO du Cameroun ont réussi à maintenir un équilibre raisonnable du milieu humide, granitique ou volcanique, malgré une forte population (150 à > 600 hab /km²) (voir Roose, 1994).

Chez les Dogons du Mali, les **alignements de pierres et les murettes ont été** combinés à l'entretien de la fertilité par le fumier et la biomasse des arbres sélectionnés. 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 développé toute une série de techniques conservatoires de l'eau et des sols (Roose, 1994) :

- *petits champs entourés de blocs de grès piégeant le sable en saison sèche et le ruissellement lors des averses,

- *murettes de pierres et remontée de terres sableuses 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 milieu aride et sableux,

- *élevage de vaches, chèvres et moutons en case pour produire du fumier de qualité.

Au Maroc, Roose, Laouina et Sabir (2010) ont décrit et analysé une trentaine de techniques de gestion de l'eau et de la fertilité des sols sur les pentes de l'Atlas et du Rif.

En Europe, sous la pression démographique, il a fallu abandonner les longues jachères naturelles. Le travail du sol et l'enfouissement du fumier furent introduits pour restaurer la fertilité des champs. 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. Actuellement, la mécanisation de l'agriculture entraîne l'abandon de ces méthodes décrites avec admiration par les géographes, mais méprisées par les experts

modernes qui les considèrent comme insuffisantes pour résoudre les problèmes des grands bassins versants....Sans vouloir idéaliser ces techniques traditionnelles, il faudrait reconsidérer ces positions, étudier les conditions de leur fonctionnement et développer les possibilités de leur amélioration.

3.4. Les stratégies modernes d'équipement hydraulique des campagnes.

Plus récemment, diverses stratégies modernes de lutte antiérosive ont été orientées vers l'amélioration foncière, les chantiers de terrassement pour structurer les paysages et équiper la petite hydraulique agricole. La priorité a été accordée à la gestion des eaux par des dispositifs mécaniques.

***La restauration des terrains de montagne (RTM)** fut développée en France à partir de 1850, puis dans les montagnes entourant la méditerranée, pour protéger les plaines fertiles et les voies de communication des dégâts causés par les torrents. Les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, restauré la couverture forestière et corrigé les ravines et les torrents par des techniques de génie civil et biologique. En France, il fallut faire face à une crise sociale : les petits paysans montagnards ne pouvaient survivre sans faire pâturer leur troupeau sur les terres communales qu'ils ont fini par dégrader et surpâturer (Lilin, 1986).

***La conservation de l'eau et des sols (CES)** a été organisée aux USA depuis 1930 par des agronomes. L'extension rapide des cultures industrielles comme le coton, l'arachide, le tabac et le maïs dans la Grande Plaine semi-aride, a déclenché une érosion catastrophique par le vent et par l'eau. En 1930, en pleine crise économique, 20% des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous l'impulsion de Bennet (1939), l'État a constitué un service de conservation de l'eau et des sols, présent dans chaque canton pour aider les fermiers qui demandaient un appui technique et financier pour aménager leurs terres.

***La Défense et restauration des sols (DRS)**, sorte de mariage entre les deux systèmes, 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 barrages et les ports, suite à la dégradation des routes et des terres. Il s'agissait avant tout de mettre en défens les terres dégradées par le surpâturage et les défrichements et de restaurer le potentiel d'infiltration par la plantation d'arbres considérés comme le moyen le plus sûr de restaurer les sols. D'énormes moyens mécaniques et une main d'oeuvre abondante ont été mis en œuvre pour capter le ruissellement en nappe dans les terres cultivées (diverses banquettes et gradins forestiers), reforester les terres dégradées et restructurer les zones d'agriculture intensive (Monjauze, 1964 ; Gréco, 1978).

Deux écoles s'affrontent :

* l'une, à la suite de Bennet (1939), observe que c'est le ravinement qui provoque les transports solides les plus spectaculaires. Or l'énergie du ruissellement = $\frac{1}{2}$ Masse X Vitesse². La lutte antiérosive s'organise donc autour des moyens mécaniques pouvant réduire la vitesse et la force érosive du ruissellement (banquettes de diversion, seuils et exutoires enherbés) sans réduire la masse du ruissellement au champ.

*l'autre école, à la suite des travaux de Ellison (1944) sur la battance des gouttes de pluies et des équipes de Wischmeier et Smith (1960), rappelle que le ruissellement se développe après que la battance des pluies a dégradé la structure de la surface du sol. 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.

Toutes ces démarches n'ont pas été totalement inutiles, car sans elles les paysages auraient probablement été plus dégradés et surtout elles ont donné du travail à des masses de travailleurs démobilisés des guerres coloniales. Cependant, on s'est mis à douter du bien fondé de la démarche de CES lorsqu'une équipe américaine a révélé que finalement l'érosion n'avait guère modifié la productivité des terres profondes (Lovejoy and Napier, 1976).

Dans les années 1980, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec de ces approches technocratiques qui ne tiennent pas compte de l'avis des paysans et n'améliorent pas la fertilité des sols, ni le rendement des cultures (Lovejoy et Napier, 1976 ; Heusch, 1986 ; Roose 1987, 1994 ; Hudson, 1992). Au Maghreb et en Afrique occidentale, les paysans préfèrent souvent abandonner les terres aménagées par l'Etat plutôt que d'entretenir les structures de protection dont ils ignorent l'objectif et le propriétaire (Heusch, 1986).

3.5. La révolution verte. Face aux famines de plus en plus fréquentes qui ravagent les pays tropicaux à forte densité de population dans les années 1960, s'est développée une agriculture industrielle qui s'appuie sur la standardisation des facteurs de production, l'usage de variétés à haut rendement, l'irrigation et l'usage intensif d'engrais chimiques et de pesticides, la moto-mécanisation et le crédit (Allaverdian et al., 2014). Cette révolution verte a permis d'augmenter rapidement la production agricole de pays émergents comme l'Inde, le Brésil et l'Argentine, mais a causé la misère de nombreux petits producteurs qui, à la suite de récoltes catastrophiques (sécheresse, maladies, parasites) ont été privés de leur lopin de terre pour rembourser les grosses sociétés qui leur avaient prêté les moyens de production. On a vu arriver en ville de nombreux paysans ruinés cherchant du travail et peuplant les bidonvilles des faubourgs industriels. La production régionale a fait un bond en avant au prix de graves pollutions et d'une terrible pauvreté qui empêche les paysans d'acheter la nourriture produite sur leurs terres. D'où en 2009, les nombreuses manifestations des paysans pauvres affamés dans les grandes villes d'Afrique et d'Amérique latine.

3.6. L'agro-écologie, la révolution doublement verte et l'agriculture de conservation.

Devant les échecs sociologiques et environnementaux, ainsi que le retour de la pauvreté et de la malnutrition dans certains pays, une nouvelle approche agricole s'est développée qui intègre mieux l'homme dans un milieu plus naturel. L'agroécologie (AE) est à la fois une discipline scientifique, des pratiques agricoles imitant au mieux la nature et un mouvement social. Depuis les années 2000, les experts s'intéressent d'avantage aux liens entre producteurs, consommateurs, sociétés, ressources naturelles et production agricole. L'agro-écologie s'efforce de comprendre la nature et de l'imiter dans les champs de culture. Elle est basée sur cinq grands principes : 1/ le recyclage de la biomasse et la disponibilité des nutriments ; 2/ la sauvegarde des MO du sol, des activités biotiques et des conditions favorables au développement des plantes ; 3/ La réduction des pertes d'eau, d'énergie et des nutriments grâce à la couverture du sol ; 4/ le renforcement de la diversité génétique, des associations et rotations des cultures; 5/ le renforcement des interactions biologiques parmi les composants de l'agrosystème (Allaverdian et al., 2014).

En Europe, l'AE se matérialise par l'agriculture biologique. En Amérique, l'AE s'est construite sur le savoir empirique des paysans pour gérer les ressources naturelles et a donné naissance à l'**Agriculture de Conservation (AC)**, faisant appel aux techniques culturales qui protègent le sol (rotations céréales/légumineuses, semis direct sous couverture des résidus de culture ou des légumineuses) mais aussi aux OGM et désherbants chimiques, bien loin des principes de l'AE. En Asie, l'AE se décline autour de cultures spécifiques (riz) ou de lutte intégrée contre les ravageurs. En Afrique de l'Ouest, les expériences sont limitées aux techniques traditionnelles comme le Zaï, les parcs à Faidherbia, la fumure animale, le paillage, les soins phytosanitaires naturels (neem) et les plantations d'arbres ou de haies vives (Allaverdian et al., 2014).

3.7. La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols

(GCES). Lors du séminaire de Porto Rico (1988), réunissant 150 chercheurs, développeurs des quatre continents, une nouvelle stratégie participative a vu le jour qui tente à la fois de résoudre les problèmes immédiats des paysans (valoriser la terre et le travail) tout en améliorant l'environnement (restauration des sols et de l'infiltration). Cette approche a été nommée « **Land husbandry** » (soigner la terre) par Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer (1988) et « **Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols** » par Roose (1987), Ndayizigiye (1993), Smolikowski (1993) et Laouina (2007). La GCES prend pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et comment gérer ces problèmes en trois phases :

***des dialogues préparatoires** entre paysans, chercheurs et services techniques pour localiser les problèmes, évaluer leur importance, décrire leurs causes et les facteurs sur lesquels on va intervenir. Ils comprennent deux enquêtes et un tour de terroir avec la

communauté villageoise pour découvrir avec eux les problèmes de dégradation du terroir, les stratégies déjà mises en œuvre et les contraintes socio-économiques.

* **des expérimentations sur leurs champs** pour évaluer les risques d'érosion et vérifier la faisabilité, la rentabilité et l'efficacité des techniques antiérosives préconisées par les paysans et les spécialistes.

* enfin **un plan d'aménagement global** pour intensifier l'exploitation des meilleures terres, structurer le paysage, stabiliser les ravines et les terres en privilégiant les méthodes biologiques simples et maîtrisables par les paysans eux-même. 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 des paysans (petit paysan luttant pour sa survie ou gros propriétaire ou éleveur) les solutions seront différentes, même si le milieu physique est le même. C'est là une différence majeure avec les approches développées antérieurement : la diversité des solutions en fonction des conditions humaines et physiques et leur extension à l'ensemble du bassin versant.

La GCES propose une démarche positive : passer de la lutte contre l'érosion le ruissellement et l'acidification des sols...à la gestion des ressources naturelles, l'eau, la biomasse et la fertilité des sols, en cohérence avec le meilleur du savoir-faire paysan et dans la volonté d'élargir les moyens d'action des populations rurales.

Alors que la CES, la DRS et la RTM ont pour objectif de sauver le patrimoine foncier à long terme, les paysans africains vivent au jour le jour. La **GCES doit donc être rentable immédiatement** pour justifier les efforts exigés des paysans pour gérer les eaux excédentaires sans inonder les plaines et garder sur place la terre sans polluer en aval. Pour y arriver, il faut combiner :

* **la gestion des eaux de surface** selon les zones climatiques : stocker les eaux près de ou dans les meilleurs sols dans les régions arides, infiltrer toutes les pluies fécondant les champs grâce à la couverture végétale complète du sol en zones tropicales humides, évacuer sans danger les pluies excédentaires dans les zones sujettes aux tornades, tempêtes tropicales et aux cyclones.

***la gestion des sols, des M.O. et des nutriments**. Il ne s'agit pas seulement de garder en place la majorité des terres, mais d'éviter l'érosion sélective des M.O., argiles et limons, ainsi que les nutriments qui y sont attachés. Avec la croissance démographique et la pression foncière, la jachère tend à disparaître et grâce à la mécanisation du travail du sol, les surfaces cultivées tendent à s'étendre sur les terres plus fragiles et plus pauvres. Pour éviter ou ralentir la dégradation des MO (indispensables pour assurer la stabilité structurale du sol et le stockage en eau et en nutriments), les paysans valorisent les déchets de culture et de ménage (fumier, compost, paillage) et développent des techniques telles que cultures de

légumineuses fourragères associées aux cultures de base, haies vives et arbres en alignement dans les champs (Pieri, 1989).

***la gestion de la biomasse et des plantes cultivées.** Les sociétés de développement ont proposé des systèmes de culture intensifs : coton/maïs en zone soudanienne ou arachide/mil sur sol plus sableux et climat plus sec. Ces systèmes combinent l'apport de 200 kg/ha/an d'engrais sur la culture de rente, le labour et le sarclo-buttage, la traction bovine et la production de fumier et compost, les rotations entre céréales et légumineuses, la sélection des semences répondant bien aux engrais et l'usage régulier de pesticides et d'herbicides. Les rendements des cultures ont été multipliés par 2 à 4 (=1500 à 2500 kg/ha/an) et jusqu'à dix fois en station. Mais au bout de dix ans, l'amélioration du rendement par les engrais minéraux a diminué de 10%, et le stock d'humus du sol décroît de 2 à 4 % l'an sur sols sableux et jusqu'à 7 % si l'érosion et le drainage restent importants (Pieri, 1989).

***L'enfouissement des résidus de culture et des adventices** ne suffit pas, d'autant plus qu'ils sont valorisés par le bétail ou l'artisanat et ne couvrent plus, avant les semis, que 10% de la surface du sol. L'enfouissement de pailles grossières (à C/N>40) entraîne une « faim d'azote » tandis que les engrais verts excitent l'activité microbienne et accélèrent la minéralisation des réserves d'humus stable du sol. Il existe pourtant au Rwanda, quelques techniques traditionnelles qui consistent à faire sécher les adventices en tas, de les recouvrir de terre et de les planter de patates douces. A leur récolte, la terre humifère est répandue sur la parcelle.

***Intérêt et limites du fumier.** L'apport de 3 à 10 t/ha/an de fumier ou compost bien décomposés (C/N < 15) complété d'un appoint minéral indispensable pour corriger les carences du sol et les besoins des plantes, semble maintenir la productivité des terres, éviter l'acidification, favoriser un enracinement profond et les activités biologiques (Chopart, 1980 ; Roose, 1994). Mais les apports de fumier par le bétail ont une limite. En système extensif, une vache tropicale donne 0,6 t/an de poudrette, alors qu'il faut 3 t/ha/an de fumier pour entretenir le niveau de carbone du sol au-dessus du niveau critique (C=0,6 %). Or il faut 4 ha de parcours pour nourrir une vache tropicale et donc **20 hectares de parcours + 5 vaches pour entretenir par le fumier un hectare de terre cultivée**. En système intensif on peut nourrir une vache avec les résidus de culture d'un hectare et produire 1,5 t/an de fumier par vache maintenue sur litière pendant la nuit et les heures chaudes: avec un ha de cultures fourragères intensives on peut donc entretenir deux vaches et produire les 3 t/an de fumier sur litière. Mais du point de vue du sol, 40% de la biomasse sont perdus sous forme gazeuse, 30% sont abandonnés tout au long du parcours et **seulement 30 à 40 % des nutriments de la biomasse ingérée peuvent être restitués par les paysans sous forme de fumier!** (Guérin et Roose, 2017). On constate effectivement dans les systèmes intensifs

du Rwanda (densité 250 hab/km²) que la fumure organique n'entretient qu'un tiers de l'exploitation (moins d'un ha pour nourrir 4 à 10 personnes), le reste du terrain est réservé à des *cultures* peu exigeantes comme le manioc et les patates douces. L'élevage du petit bétail sur les terres communales et les bords des chemins, est souvent le seul moyen pour les petits paysans de survivre et d'amasser un petit capital pour parer aux besoins urgents de la vie (accidents, maladies, écoles) et aux relations sociales (mariages, funérailles, etc) (Roose, 1994).

***Le compostage** est une filière longue pour transformer la biomasse (6 à 18 mois) dont le rendement est encore plus faible (10 % de la biomasse) que pour le fumier et qui demande beaucoup de travail pour réaliser un compost de qualité (double transport de la biomasse, humidification, retournement). C'est pourtant une pratique valable pour ceux qui ne disposent pas de bétail ou qui disposent de grandes quantités de déchets industriels (parches de café, drêches de brasserie et surtout gadoues de ville). On a essayé de creuser des fosses compostières aux champs pour éviter le double transport de la biomasse, mais la plupart sont restées vides ou ont donné du compost de mauvaise qualité. Seules sont efficaces les « compostières-fumières-poubelles » situées près de l'habitat où sont entassés tous les résidus disponibles aux champs ainsi que les eaux usées, les cendres et déchets des ménages. Pour réduire les pertes, on préconise de petites fosses (4 x 2m) plantées d'arbres à usages multiples qui fournissent une ambiance fraîche et humide, de la biomasse riche en minéraux (légumineuses) et dont les racines récupèrent les solutions lessivées du tas de compost par les eaux de drainage. Comme une famille ne peut produire qu'un maximum de 5t/an (soit 0,2 à 0,5 ha fumés) il faut trouver des solutions complémentaires pour fumer l'ensemble de l'exploitation, mais cela peut fournir une bonne base pour démarrer des cultures maraîchères.

***Le paillage épais** (>5cm ou 20t/ha) est une technique très efficace pour réduire l'évaporation du sol, la croissance des adventices, maintenir le sol humide en saison sèche et arrêter le ruissellement et l'érosion et fixer le carbone dans le sol. Il ne s'agit pas seulement de récupérer la paille des céréales et autres graminées, mais aussi tous les résidus de culture tels que les feuilles, tiges de bananier et branchettes des arbres, en particulier les petits bois coupés (BRF). C'est aussi une filière courte pour restituer la totalité de la biomasse disponible et les nutriments qui la constituent (K, Ca, Mg, C en premier lieu par le lessivage lors des pluies, N et P à mesure de l'humification puis la minéralisation par la mésofaune). La minéralisation de la litière est 30% plus lente que lorsque la MO est enfouie par labour. Les risques de carence en azote sont moins grands que si on enfouit les pailles. Sous forêts les sols sont généralement plus fertiles bien que la litière n'est jamais enfouie par le labour, mais par la mésofaune (vers de terre, termites, etc). Les sols non dégradés sont bien capables d'ingérer les MO déposées à la surface. Au Rwanda les parcelles paillées sous

caféiers et bananiers sont les moins érodées et les mieux conservées des collines cultivées et même des vieilles jachères (Duchaufour, 2017). Malheureusement, on ne dispose pas d'une masse suffisante de résidus végétaux pour couvrir toutes les terres cultivées.

Cependant, **un paillage léger (2 à 6t/ha) répandu en début de saison des pluies**, une fois le sol préparé et semé, dissipe l'énergie des premières pluies souvent orageuses et maintient pendant 2 à 3 ans une bonne infiltration (ex en Martinique, 6 t de bagasse de cannes à sucre ont supprimé pendant 2 ans le ruissellement sur un sol complètement érodé jusqu'à la roche (Roose, Venumière et Khamsouk, 2017). Même si le paillage ne couvre que 50% de la surface du sol, il peut réduire de 80% les risques d'érosion, surtout si on le range en bandes perpendiculaires à la pente (Rishirumuhirwa, 2017) ou si on l'étend sur l'ensemble de la parcelle (Roose, 1994).

***L'épandage des branchettes des arbres (brf)**. Le type de matériel utilisé pour pailler pourrait avoir des effets différents s'il s'agit de pailles riches en cellulose facilement minéralisées ou de bois riche en lignine favorable au développement des champignons. Au Burkina Faso, dans la zone sahélienne, Mando (1997) a répandu sur trois types de sols un paillage (3 à 6 t/ha) de branchettes de *Pterocarpus lucens*, ou de *Pennisetum pedicellatum*, ou un mélange des deux. Deux ans plus tard, il a observé peu de différence de comportement en fonction des sols ou des types de mulch, mais le développement de placages de termites entraînant une amélioration de l'infiltration, du stockage de l'eau et de la croissance des plantes. A Gampela, en zone soudano-sahélienne, sur un glacis de sols ferrugineux sablo-argileux pauvre, une équipe de l'ENGREF, de l'IRD et de l'INERA a étudié l'influence d'un apport de biomasse (1,5 et 6 t/ha) de branchettes de *Piliostigma reticulata* ou de tiges de sorgho. A la suite d'un apport raisonnable de 1,5t/an, aucune amélioration du sol n'a été constatée au bout de trois années, en fonction du type de paillage (paille ou BRF), ni du mode d'apport (enfoui ou en surface). Par contre on a constaté dès la première année, le développement rapide de l'activité des termites à la surface du sol. Par la suite une dose de 6t/ha/an a été incluse à l'essai. Les rendements en grain des cultures ont été améliorés de 5 à 40 % pour un apport annuel de 1,5t/ha et le gain en paille de 44 à 80 % par rapport au témoin. Le gain en grains s'élève de 60 à 116 % pour une dose de 6t/ha de branchettes fragmentées. Mais la production de céréales n'a cessé de diminuer au cours des années ce qui indiquerait qu'on n'a pas atteint l'équilibre du sol, ni un système de production durable (Barthès et al., 2014). Ces résultats divergent avec ceux d'autres études en régions tropicales qui montrent qu'un apport d'une t/ha de BRF a augmenté le rendement du mil de 70% et celui de tomates de 10 à 25%. Par ailleurs, l'étude de la disponibilité de la ressource en branchettes atteint 1,9 t/ha /an en zone soudanienne et 0,9t/ha/an en zone sahélienne. Le stock de branchettes s'épuiserait rapidement ce qui suppose une densification des peuplements (haies vives et parcs).

Pour éviter le travail excessif de fragmentation des branchettes, traditionnellement, les séniors étalent directement des branchettes sur la surface de leurs petits champs déjà préparés et semés : après quelques semaines, les feuilles se détachent des branchettes et les branchettes deviennent disponibles comme bois de feu pour la cuisine.

Ces études montrent que si le paillage est très utile pour maîtriser le ruissellement et l'érosion, leur apport en nutriments ne suffit pas pour intensifier durablement la productivité de ces sols, labourés ou non.

***L'agroforesterie** ou l'association de certains arbres aux cultures, en particulier l'implantation de haies vives en courbes de niveau tous les 5 à 10 mètres, permet de produire du fourrage en saison sèche et du paillage pour protéger les jeunes semis de l'agressivité des pluies. On associe généralement des arbres à des arbustes de légumineuses ayant un enracinement profond et capable de fournir 4 à 8 tonnes de M.O. sèche/ha/an (Ndayizigiyé et Roose, 1996 ; König, 1992). Grâce aux remontées par les racines profondes, la biomasse produite par 1000 mètres de haie fournit 115 kg de N, 10 kg de Phosphore et 40 kg de Ca+ Mg + K. Mais malgré ces apports de biomasse, il est nécessaire de prévoir un apport minéral complémentaire si on veut intensifier durablement la production vivrière. D'une part pour amender le milieu, supprimer la toxicité aluminique en amenant le pH >5 et permettre aux légumineuses de se développer. D'autre part, pour compenser les carences du sol en fournissant directement aux plantes cultivées les nutriments dont elles ont besoin, là où elles en ont besoin et au moment où elles sont capables de les capter et de les stocker.

***L'apport en nutriments des biomasses.** Le paillage non seulement réduit l'érosion mais améliore progressivement l'horizon humifère du sol en ramenant à proximité des racines superficielles du carbone (environ 50% de la biomasse) qui va servir d'énergie pour les microbes qui vont minéraliser la biomasse et libérer les nutriments prélevés en profondeur par les racines. On observe que les branchettes et surtout les feuilles des arbres sont plus riches en azote et en cations que les herbes locales ou les pailles des céréales peu fertilisées. Par contre les teneurs en phosphore sont très faibles tant dans les branchettes que dans les pailles des herbes et des céréales peu fertilisées. L'apport de 1,5 t de MS/ha/an de branchettes de *Piliostigma reticulata* est insuffisant en N, P, K pour remplacer les nutriments exportés par 10 quintaux de grains de mil, surtout si on exporte aussi les pailles : il faudrait six tonnes de MS pour compenser ces exportations, ce qui est difficile à trouver et à transporter.

Tableau 1. Comparaison des apports de nutriments et d'autres formes de fumures à l'exportation de 10 quintaux de mil.

*Exportation de 1T de mil==> 30 N +10 P2O5 + 56 K2OGanry et al chap 13, 2017

*Fumure minérale faible == > 21 N + 10 " + 10 K2O " "

*Fumier de parc 3t MS/ha==>30 N + 20 " + 48 K2ORichard, 1985

*BRF de Piliostigma, 1,5t ==>20 N + 3" + 15 K2OBarthès et al., 2010

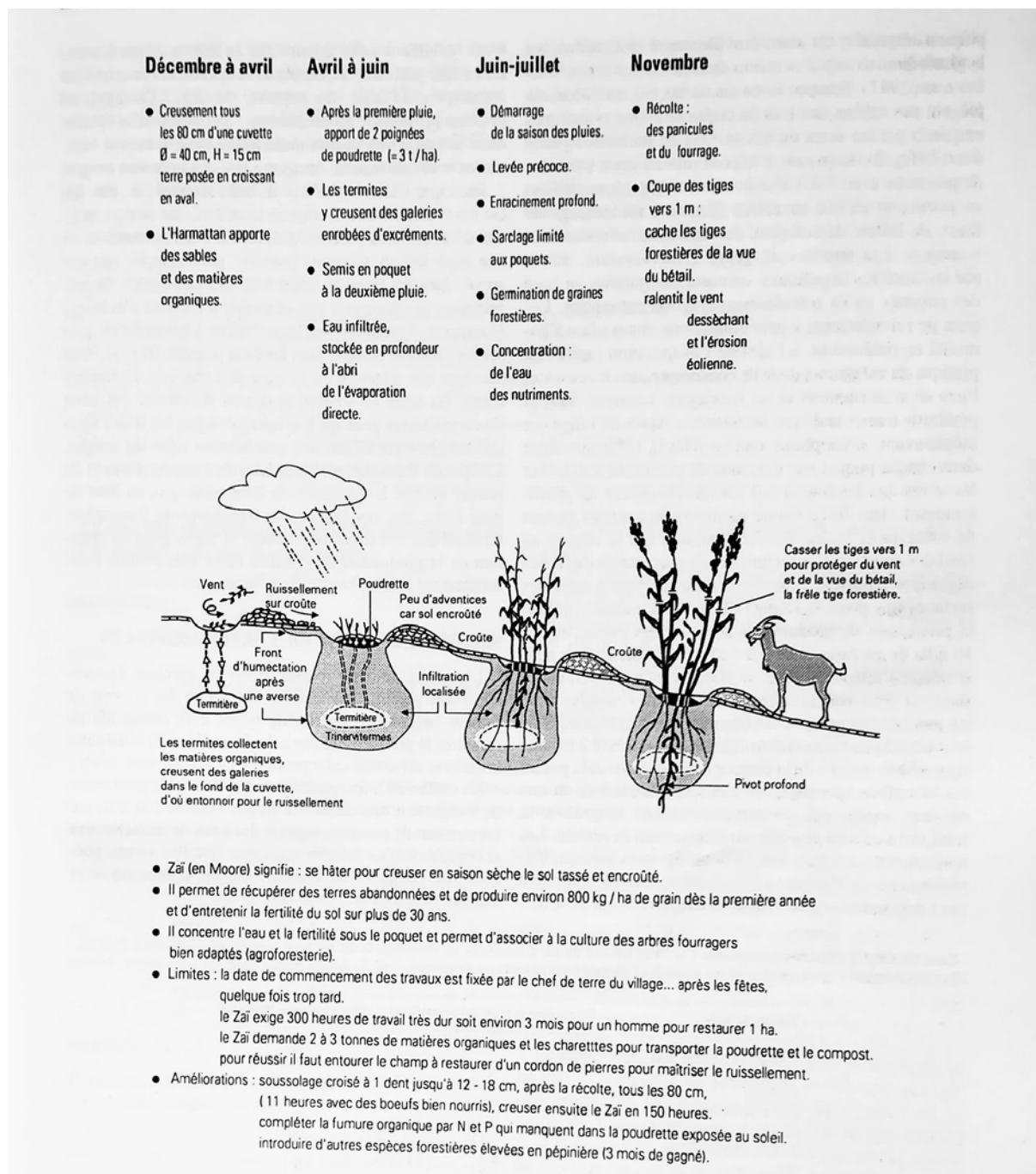
Au Rwanda, Ndayizigiye et König (voir chap 10 et 12 de cet ouvrage) ont analysé la biomasse produite par 1000 m de haie de Calliandra, soit 4 t/an de MS, 105 à 125 kg de N, 9 à 12 kg de P2O5 et 20 à 40 kg de K2O, CaO, MgO. : leur apport sous forme de paillage n'a pas entraîné non plus d'amélioration de la production vivrière, sauf si on apporte un complément minéral, en particulier du phosphore.

3.8. La restauration des sols cultivés. Pour la majorité des pédologues, « le sol est une ressource non renouvelable » (Ruellan, 2010). En effet, si une roche est mise à nu par l'érosion, il faut des milliers d'années pour désagréger la roche en petits morceaux et altérer les minéraux pour produire des argiles et un vrai sol capable d'accumuler les nutriments et assez d'eau pour alimenter les plantes cultivées (Roose, 1994). Or en Afrique occidentale, il existe de grandes surfaces désertifiées, érodées et encroûtées, suite au surpâturage ou au labour combiné à l'érosion éolienne et hydrique : ces terres ont perdu leur couverture végétale, leur horizon humifère, leur stabilité structurale et ont développé des croûtes d'érosion capables de réduire leur capacité d'infiltration à quelques mm/h. Elles sont à l'origine d'un ruissellement abondant, parfois captés dans des mares (« boulis ») creusées pour le bétail ou des petits jardins maraîchers. Les Mossi du Burkina, les Dogons du Mali et les Nigériens ont développé des techniques de restauration de la productivité des sols de la région soudanienne (pluie annuelle de 300 à 800 mm) dénommées Zaï au Burkina (Roose et al., 1993). Lorsque la pression foncière se fait durement sentir, les paysans sont capables de récupérer ces terres dégradées en captant le ruissellement, en concentrant le fumier dans de petites cuvettes (20 à 40 cm de diamètre), en y semant une douzaine de graines de mil ou de sorgho, dès les premières pluies. Les termites (*Trinervitermes*), attirées par les MO de la surface, creusent des galeries qui accélèrent l'infiltration du ruissellement et créent une poche de sol humide, réserve capable de nourrir les plantules pendant 3 semaines. Si on ajoute une dose raisonnée de NPK, on peut doubler les rendements en céréales. Une variante, « le zaï forestier », est particulièrement intéressante. Dans la poudrette (fèces non fermentées séchées) 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 pour la plupart. Lors du sarclage, ils conservent des plantules forestières qui profitent de l'eau et de la fumure destinées aux céréales. A la récolte, les tiges de sorgho sont coupées vers 1 mètre (hauteur des yeux des chèvres) et protègent ainsi le sol de l'érosion éolienne et les jeunes tiges forestières de la vue des chèvres. La culture des céréales se renouvelle chaque année, mais les plants forestiers sont taillés tous les 5 ans pour fournir des perches, du bois de chauffe et du fourrage. En analysant cette technique complexe,

il est apparu qu'en captant le ruissellement, en gérant la biomasse et les nutriments on favorise les activités de la faune et de la microflore et on arrive en quelques années à restaurer la capacité de produire du sol et à mettre en place un système agro-sylvo-pastoral durable. Ce système peut être adapté aux plantations d'arbres fruitiers résistants (oliviers, grenadiers, etc) plantés au milieu de cuvettes où se concentrent les eaux de ruissellement et la fumure organique et minérale

La restauration des sols dégradés est donc possible, mais elle a un prix : beaucoup de travail, transporter les pierres pour aménager les cordons, produire et déplacer le fumier (3 t/ha/an), gérer les eaux et les nutriments pour que les cultures développent une abondante biomasse (Roose, 1994)

Figure 3.1. Les pratiques du zaï au cours de la saison culturale en vue de la restauration de la productivité des sols et la réhabilitation de la végétation dans les zones soudano-sahéliennes



3.9. L'aménagement des terres décapées jusqu'à la roche.

* **Si les roches sont dures**, très lentes à s'altérer, la meilleure utilisation en zone de montagne semi-aride est de gérer ces parcelles comme un impluvium, de capter les eaux de ruissellement dans un caniveau ou une piste bétonnée qui les stocke dans une citerne creusée dans le sol et imperméabilisée par un crépi. Après désablage, ces eaux 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 exemples de cette stratégie d'intensification localisée ont été développés en Haïti (Smolikowski, 1993) au Maroc, au Mali et au Burkina Faso (Roose, 1994).

Dans le parc régional de la presqu'île de la Caravelle en Martinique, plusieurs versants très pentus sur lave acide subissent un décapage de la couverture pédologique jusqu'à la roche : il envase l'espace protégé de la baie du Trésor. Grâce à une convention entre l'IRD et le parc (PNRM), l'érosion a été évaluée sur cinq petits bassins de 83 à 130 m². Avant aménagement, l'érosion a varié de 21 à 39 t/ha/an. Dès que l'épandage de bagasse de canne à sucre a réalisé un paillage complet, l'érosion a été annulée et le ruissellement (30%) a été réduit à 3 % des pluies. Mais après deux ans, la litière étant partiellement minéralisée, l'érosion remonte progressivement de 5 à 21 t/ha/an. La bagasse a presque disparu et le couvert végétal n'a pas encore pris le relais. La deuxième année, l'équipe du parc a creusé 121 cuvettes de 40 x 40 x 40 cm et planté 4 espèces locales d'arbres avec trois traitements : 1/témoin, 2/ apport d'un seau de compost à pH 5 et 3/ compost + engrais chimiques (50 g /cuvette de N2+P14+ K24). Six mois après l'application de la bagasse, la surface du sol a bruni mais la surface couverte par les végétaux a peu progressé : 4 à 6 % pour les herbes et 5 à 12 % pour les arbustes. Le nombre de plants morts est important dès la première année et plus encore durant l'année humide (cyclones). Par contre le développement des plants vivants est bien meilleur dans les cuvettes recevant des MO et des engrais minéraux.

La technique des cuvettes n'est donc adaptée que pour des zones recevant entre 300 et 850 mm par an : en cas de tempête tropicale ou de cyclone, ces cuvettes sur roches imperméables peuvent entraîner l'asphyxie des racines.

***Si les roches sont tendres** (schistes, marnes, argillites, grès tendres, cendres volcaniques) ou s'altèrent rapidement comme les basaltes, il est difficile de couvrir toute la surface avec un paillage suffisant. Il reste possible d'appliquer la « technique du pot de fleurs » qui consiste à concentrer localement l'eau, les nutriments disponibles et les soins à quelques plantes intéressantes. Il s'agit de creuser tous les 5 à 10 mètres en quinconce une fosse de 1 m³ d'y mélanger le peu de terre minérale dont on dispose à deux poignées de NPK plus un seau de fumier/compost bien décomposé et d'y planter un bananier ou un arbre fruitier et en bordure un mélange de plantes (légumineuses si possible) rampantes qui vont envahir progressivement l'espace entre les plages de culture intensive. Il reste à organiser le

ruissellement vers la fosse, le drainage des excédents éventuels et à déverser progressivement 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. Au Mali, on installe sous un impluvium des lignes d'arrêt (bandes de résidus de cotonniers, sorgho, mil, et branchages d'arbustes locaux) qui vont ralentir le ruissellement, capter les sédiments, les graines entraînées par le vent et les fèces déposés par les animaux. On y installe progressivement des haies vives fourragères.

3.10. Conclusions

*Au cours de son histoire, l'homme a participé à la dégradation du milieu naturel en défrichant les forêts, en exposant les sols labourés à l'agressivité des pluies, en accélérant la minéralisation des matières organiques et en acidifiant le sol par l'usage abusif d'engrais minéraux.

*Mais il a aussi progressé dans la connaissance des processus de dégradation et restauration des sols : il a mis au point de nombreuses techniques de gestion de l'eau, des nutriments et de la biomasse qui ont permis d'intensifier la production, et de répondre à la croissance démographique et aux appétits grandissants d'une population qui double tous les 20 ans et envahit les villes.

*L'expérience acquise par un siècle de « conservation des sols » montre que les approches mécaniques de terrassement sont moins efficaces que les approches biologiques et généralement moins bien acceptées par les paysans car elles réduisent les surfaces cultivables, elles n'améliorent pas le rendement des cultures mais exigent beaucoup d'entretien.

*Actuellement, 900 millions de gens souffrent encore de la malnutrition : il reste beaucoup de progrès à faire. L'histoire de la lutte contre l'érosion et le ruissellement nous montre que ***l'homme a été progressivement déplacé du centre du problème à une part essentielle de la solution*** : rien ne peut changer durablement sans l'éducation à l'agroécologie et la prise en charge de l'environnement par les gestionnaires de la terre (= les paysans). Le chemin est encore long !

* Cet essai de synthèse de soixante années de recherche sur la lutte antiérosive, voudrait transmettre aux générations futures, le cheminement vers des approches de gestion plus durable et plus fraternelle de notre TERRE.

3.11. Eléments de bibliographie

Allaverdian C., Ferrand P., Kibler JF., Reynaud L., 2014. L'agroécologie, un concept pour une diversité d'approches. *Grain de sel*, n° 63-66: p .6-7.

Barthès B., Manlay R ., Porte O., 2010. Effets de l'apport de bois raméal fragmenté (BRF) sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cahiers d'Agriculture*, 19, 4 : 280-287.

Bennet H.H., 1939. *Elements of soil conservation*. New York, Mac Graw Hill.

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.

Duchaufour H., 2017. La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie » Eds. E. Roose, Editions de l'IRD, Marseille : p. 103-116.

Ellison W.D., 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric.Eng.* 25 : 131-181.

Ganry Fr., Thuries L., 2017. Intérêt des fumiers pour restaurer la fertilité des sols en zone semi-aride d'Afrique. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Eds. E.Roose, IRD Editions, Marseille, 711 p., chap 13:179-197.

Gréco J., 1979. La défense des sols contre l'érosion. Paris, La Maison Rustique, 163 p.

Guérin H., Roose E., 2017. Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie » Eds. E. ROOSE, Editions IRD Montpellier, chap .12: 161-178.

Harroy J.P., 1944. Afrique, terre qui meurt. Académie Royale de Belgique, 557 p.

Heusch B., 1993. Cinquante ans de banquettes de DRS en Afrique du Nord : un bilan *Cah.Orstom Pédol.*, 22, 2 : 153-162.

Hudson N., 1992. *Land husbandry*. Batsford, London, 192 p.

König D., 2017. Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « Restauration des sols tropicaux et méditerranéens » Eds. E. Roose, Editions IRD, Marseille, 711 p : chap 46 : 613-624.

Laouina 2007. La GCES au Maroc. Diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres. Publ. Fac FLSH., Agdal, Rabat, Maroc, 172 p.

Lilin Ch., 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. *Cah. Orstom Pédol.* 22, 2 : 139-146.

Lovejoy J., Napier T., 1986. Conserving soil : social insights. *J. Soil and Water Conservation* 41, 5 : 304-310.

Loupe D., 1991. Guiera senegalensis, espèce agroforestière? Microjachère dérobée de saison sèche et approvisionnement énergétique d'un village du centre-nord du bassin arachidier sénégalais. *Bois et Forêts des Tropiques*, 228 : 41-47.

Lowdermilk W.C., 1953. Conquest of the land through 7000 years. USDA, SCS, Agric. Info. Bulletin 99.

Mando A., 1997. Effect of termites and mulch on the physical rehabilitation of structurally crusted soils in the Sahel. *Land Degradation & Development*, 8 : 269-278.

Monjauze A., 1962. Rénovation rurale: rôle et dispositifs d'infiltration. Alger, Délégation Générale. Dept des Forêts, Service des forêts, Service DRS : 16 p.

Ndayizigiye Fr., 1992. Valorisation des haies arbustives (Calliandra et Leucaena) dans la lutte contre l'érosion au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion*, 12 : 120-129.

Ndayizigiye Fr., 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « restauration de la productivité des sols tropicaux et Méditerranéens » Eds. E. Roose, Editions IRD, Marseille 711 p. : chap.44 : 591-604.

Oldeman L., Hakkeling R., Sombroek V., 1990. World map of the status of human induced soil degradation. Projet Glasod. ISRIC Wageningen and UNEP Nairobi, Kenya.

Pieri C., 1989. Fertilité des terres de savane. Paris, CIRAD, Min. Coopération, 444 p.

Rishirumuhirwa Th., 2017. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. p 211-223. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » IRD Editions, Marseille, 711 p.

Roose E., 1981. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux d'Afrique occidentale. Thèse doct ès Sciences univ Orléans, ORSTOM Paris, coll. Travaux et Doc. N° 130, 587 p.

Roose E., 1987. Gestion conservatoire de l'eau et des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale. C.R. Séminaire ICRISAT/INRAN, Niamey, Niger : 57-72.

Roose E., Dugué P., 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.

Roose E., Kabore V., Guénat C., 1993. Le Zaï : fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso).

Cah. Orstom Pédologique 28, 2 : 159-174.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique FAO* n°70, 420 p.

Roose E., Vernumière N., Khamsouk B., 2017. Restauration d'un versant érodé jusqu'à la roche volcanique acide par épandage d'une litière de déchets de sucrerie, compost et NPK dans la Réserve naturelle de la Caravelle (Martinique). Pages 247-259. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » IRD Editions, Marseille 711 p.

Ruellan A., 2010. Des sols et des hommes : un lien menacé. Editions IRD Marseille : 105 p.

Shaxson T., Hudson N., Sanders D., Roose E., Moldenhauer W., 1988. Land husbandry. A framework for soil and water conservation. *S.W. Cons. Soc.*, Ankeny, Iowa, USA : 64 p.

Smolikowski B., 1993. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 229-252.

Tondeur G., 1954. Erosion du sol spécialement au Congo belge.

Bruxelles, Min. des Colonies, 240 p.

Van den Abeele M., 1941. L'érosion, problème africain. Bruxelles, INEAC, Sc.Naturelles, t XI.

Wischmeier W.H. Smith D.D., 1960. A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. Proc. 7th Intern.Congress Soil Science Soc. Vol.1 : 418-425.

Ziegler J., 2012. Misons sur l'agriculture familiale, pas sur les prédateurs. *La Vie* du 17 mai 2012 : 26-27.

Chapitre 4. L'érosion en nappe

Symptômes, causes, facteurs et lutte antiérosive

4.1. La cause et les processus de l'érosion en nappe

On parle d'érosion en nappe lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'attaque à toute la surface du sol et que le transport des particules arrachées s'effectue par le ruissellement en nappe : c'est le stade initial de l'érosion hydrique (Roose, 1994). Cette forme d'érosion est généralement peu visible car une érosion de 30 tonnes/ha/an, fréquente sous cultures sarclées, correspond à une perte d'épaisseur de 2 mm. Or « les sols respirent » et leur surface varie de plusieurs cm après un labour ou simplement par le gonflement des argiles en saison des pluies. Cependant, les paysans observent « que les cailloux poussent » ce qui témoigne de l'érosion sélective des particules fines (argiles, limons, matières organiques) et de l'accumulation des éléments grossiers résiduels en surface (voir figures 4.1 et 4.2) (Roose, 1977).

La cause de l'érosion en nappe est l'énergie des gouttes de pluie battant la surface du sol dénudé (Ellison, 1944). L'érosivité des pluies dépend à la fois de l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes (qui déclenche le ruissellement en nappe), de la durée des pluies (ou de l'humidité du sol) qui règle le volume du ruissellement. L'érosivité se calcule à partir de régressions entre l'intensité et l'énergie des pluies (Wischmeier et Smith, 1978 ; Roose, 1994).

L'énergie de battance est dissipée sur le sol selon cinq processus (fig. 4.1) :

- l'humectation brutale de la surface du sol faisant éclater les bulles d'air emprisonnées dans les pores des agrégats ;
- le tassement de la surface du sol sous l'impact des gouttes ;
- l'arrachement des particules et leur projection dans toutes les directions et plus efficacement vers l'aval sur les pentes ;
- la redistribution des particules vers les zones hautes en formant des pellicules de battance et vers les zones basses en accumulant des croûtes de sédimentation plus épaisses et presque imperméables ;
- le bruit du choc des gouttes sur les matériaux résistants.

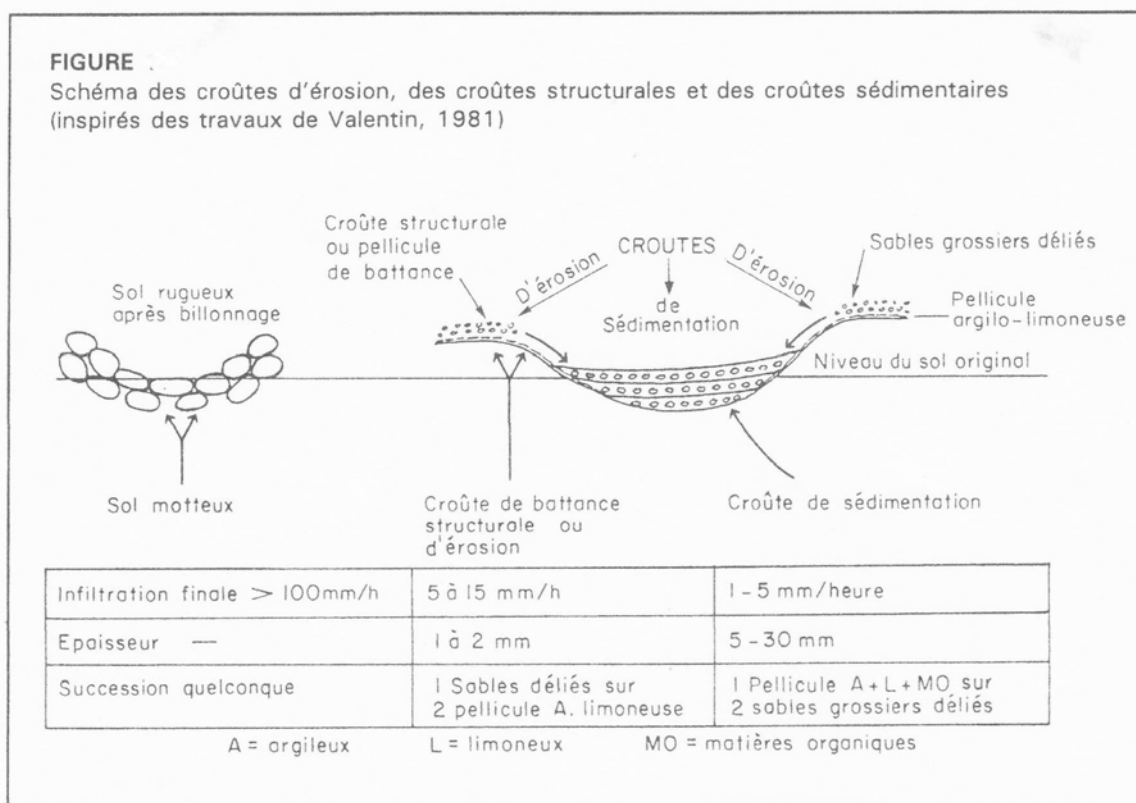


Figure 4.1. Processus de battance.

En conséquence, l'érosion en nappe modifie progressivement la surface motteuse d'un champ labouré. On peut observer :

- le nivellement de la surface du sol et la formation de pellicules de battance (1 mm), puis de croûtes de sédimentation (2 à <20 mm) dans les zones basses ;
- la squelettisation de l'horizon superficiel suite à la perte sélective des argiles, limons et MO, laissant sur place une couche de sables et graviers plus claire que le sol initial ;
- le décapage de l'horizon humifère laissant apparaître des plages des horizons minéraux de couleur plus claire ;
- la dégradation de la fertilité du sol avec la perte des nutriments attachés à la MO et aux particules fines.

4.2. Les indicateurs de l'érosion en nappe

Les traces laissées au sol par les divers types d'érosion traduisent l'efficacité locale des processus qui font appel à diverses sources d'énergie et divers facteurs qui modifient leur expression. Cependant, il y a souvent une évolution d'un processus vers un autre à

mesure que la dégradation du sol progresse. Pour évaluer les risques d'érosion, on a développé toute une série de dispositifs susceptibles de chiffrer l'efficacité de l'érosion en nappe (sur parcelles d'érosion), la progression des ravines (piquets, photos aériennes) et des mouvements en masse à certaines échelles de temps et d'espace (Lal, 1988 ; Roose, 1994). Vu les variations climatiques annuelles, les mesures doivent être menées sur de longues périodes : elles sont donc coûteuses en personnel. Elles ont donné naissance à des bases de données utilisées pour modéliser les tendances évolutives à moyen terme, des zones en pentes moyennes (2 à 25 %) pour définir des techniques culturales capables de maintenir un niveau d'érosion acceptable (tolérance = 1 à 12 t/ha/an) pour maintenir une production rentable durablement.

Vu l'urgence de réduire les problèmes d'érosion, la tendance actuelle est d'évaluer, pour chaque segment fonctionnel des versants, des indicateurs faciles à repérer à la surface du sol. Combinés aux facteurs les plus significatifs pour définir les risques d'érosion (pente, nature du sol et du couvert végétal) et situés dans l'espace à l'aide d'un GPS, ils renseignent sur les dégâts passés, mais aussi estiment les risques futurs en fonction de divers modes d'utilisation des terres (Barthès et Roose, 2002).

Ainsi l'érosion en nappe combinée avec l'érosion aratoire, peut décaper l'horizon humifère sombre en quelques dizaines d'années et laisser des plages plus claires aux endroits les plus découpés du versant : le haut des collines et les ruptures de pente convexe.

La battance des gouttes de pluie tasse le sol et laisse un voile de sables (blancs en milieu acide, roux en présence de fer), des cratères sombres (reliquat des chutes de grosses gouttes dans ces voiles claires), des « délaissés de crues » (litières et MO accrochés aux buissons, cailloux) et des colonnettes de terre projetée par la pluie sous des feuilles larges qui protègent le sol nu.

A un stade avancé, l'érosion en nappe développe des « demoiselles coiffées », petits piédestals de terre coiffés d'un objet résistant à l'attaque des gouttes (graines, cailloux, racines, feuilles, fumier ou terre tassée protégée par des lichens). Leur hauteur (0,5 à 15 cm) est d'autant plus élevée que l'érosion est forte, le sol nu et fragile et la pente raide. L'énergie des gouttes de pluie emporte les particules fines détachées, mais le ruissellement n'est pas assez fort pour déplacer les cailloux ou cisailer la base des colonnettes. Dans les sols caillouteux, l'érosion en nappe concentre en surface un voile de cailloux semblable à un reg dans le désert. Les racines des arbres constitueraient un bon repère de décapage de la surface du sol si elles ne grossissaient pas au cours de la croissance des arbres : la différence d'altitude entre la surface du sol et le centre des racines peut donner une estimation par excès de la couche de sol érodé depuis la date de plantation. L'étude de la surface des sols a été appliquée au Vietnam pour estimer l'érosion sur divers bassins versants (Pomel et al.,

2005). Au laboratoire, différents tests de stabilité des agrégats (macro-agrégats stables) sont bien reliés à la fragilité des sols

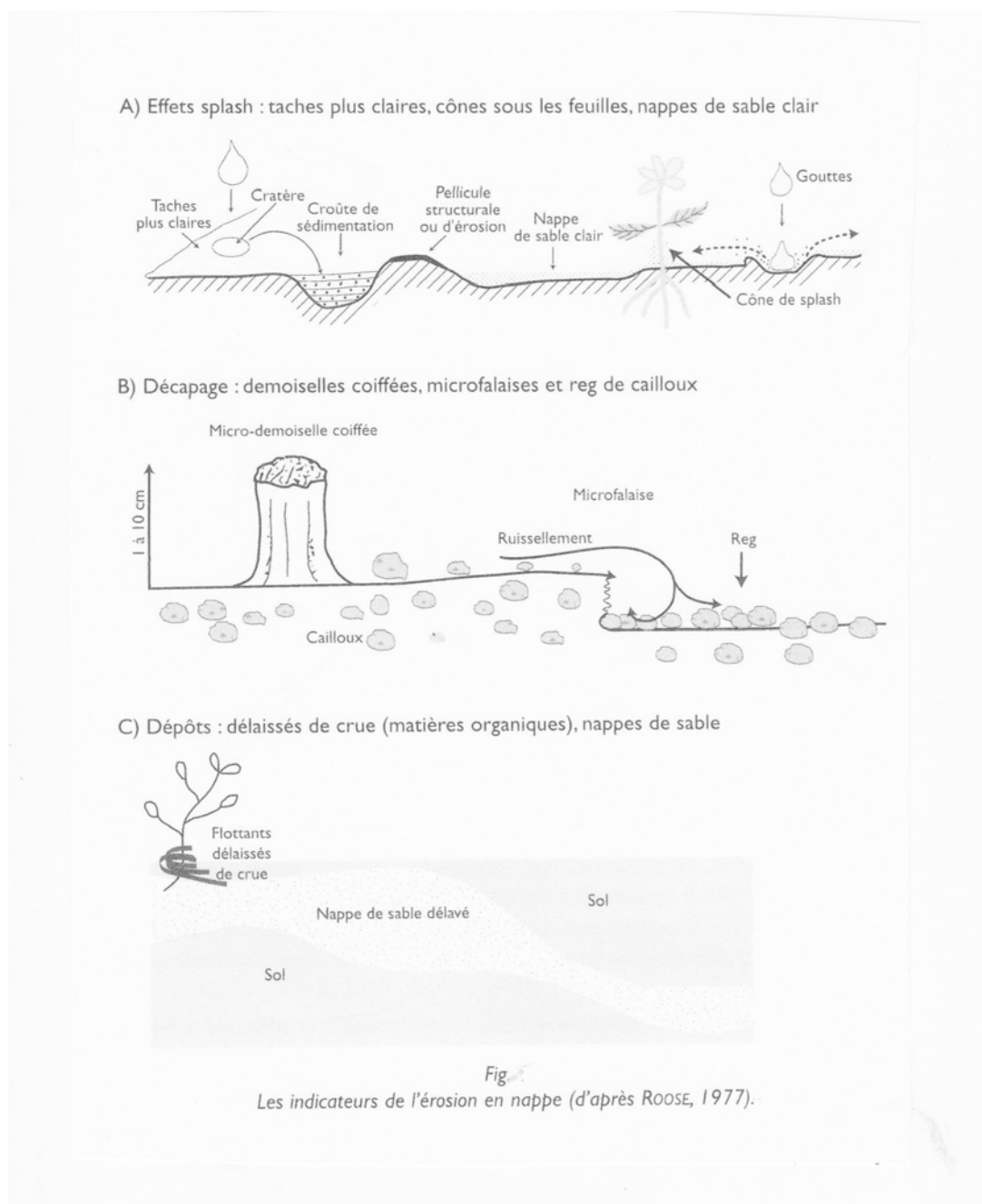


Figure 4.2. Les indicateurs de l'érosion en nappe (Roose, 1977)

Dès que le ruissellement devient abondant, il se hiérarchise et accumule assez d'énergie pour raser les demoiselles coiffées, creuser des griffes (1 à 10 cm de profondeur), des rigoles (10 à 50 cm de profondeur) qui évolueront en ravines (>50 cm) si on n'intervient pas (Roose, 1994).

4.3. Les facteurs modifiant l'érosion en nappe : le modèle USLE

« Tous les modèles sont faux, mais certains sont plus faux que d'autres » disait un modélisateur anglais. Mais faute de mieux, je me suis appliqué à chiffrer le modèle américain basé sur l'analyse statistique de plus de dix mille mesures annuelles aux USA et de vérifier s'il est applicable en Afrique (Roose, 1976).

D'après le modèle empirique USLE (Universal soil loss equation) de Wischmeier et Smith (1978), l'érosion en nappe moyenne est fonction du produit de l'énergie des pluies locales (R) par des facteurs de résistance du milieu tel que le couvert végétal (C), la pente (SL), l'érodibilité du sol (K) et les pratiques culturales antiérosives (P).

$$\text{Erosion moyenne} = R \times C \times SL \times K \times P$$

A/ L'érosivité des pluies (R = 200 à 1500)

Plus les pluies sont abondantes et intenses et plus elles libèrent d'énergie destructrice des agrégats du sol : ceux-ci seront d'autant plus fragiles que le sol est très sec (explosion des agrégats) ou très humides (faible cohésion). Le dépouillement de centaines d'enregistrements de l'intensité des pluies dans une vingtaine de sites expérimentaux a permis de conclure que : (Roose, 1994)

$$R_{am} = H_{am} \times a \pm 0,05$$

où H_{am} est la pluie annuelle moyenne ; R_{am} , l'indice d'érosivité annuel moyen a varie de 0,6 à moins de 60 km de l'Atlantique, $a = 0,45$ dans les plaines tropicales, $a = 0,25$ en montagnes tropicales, et $0,10$ en montagnes méditerranéennes

Ainsi pour une pluie annuelle moyenne H_{am} de 1000 mm, $R_{am} = 450$ en zone de plaine tropicale, $= 250$ en montagne tropicale, $= 100$ en montagne méditerranéenne. Cependant en zone de montagne méditerranéenne, les averses ont une faible intensité et une faible énergie : les risques majeurs sont liés à des averses de fréquence rare, soit des orages violents lors des changements de saison, soit des pluies longues et saturantes provoquant des inondations, des mouvements de masse, du ravinement torrentiel et la dégradation des berges des oueds.

B/ La couverture végétale du sol et les cailloux (C=1 à 0,001)

Le facteur qui réduit le plus l'érosion potentielle développée par les pluies est la surface du sol recouverte par la canopée des végétaux, mais surtout par la végétation qui rampe à la surface du sol (adventices, plantes de couverture, résidus de culture, litière, produit de la taille des haies, paillage, mousses, cailloux). Plus la canopée est haute, moins elle protège la surface du sol car les gouttes de pluie accumulées au bout des feuilles reprennent très vite de l'énergie durant leur chute.

L'influence des cailloux est plus complexe. Les cailloux qui pointent à la surface du sol, dissipent l'énergie des pluies et réduisent l'érosion. Par contre les cailloux enfouis près de la

surface du sol ou dans une croûte de battance augmentent le ruissellement car les cailloux sont beaucoup moins poreux que les mottes de terre. Enfin les cailloux posés sur des surfaces motteuses retardent la destruction des agrégats et favorisent l'infiltration.

La plantation précoce et dense, et l'usage raisonné des engrais réduisent la surface dénudée du sol et les risques d'érosion. Les cultures associées ou décalées, l'agroforesterie, le paillage et la gestion des adventices séchant en surface, le choix de variétés vigoureuses ou rampantes forment autant d'obstacles à l'énergie des pluies et du ruissellement ou de pièges aux sédiments. Cette biomasse crée un milieu favorable à la diversité de la faune et de la microflore du sol.

Le travail du sol améliore l'infiltration mais d'autant plus temporairement que le sol est peu stable : il dénude la terre et la rend sensible à la battance. Le labour enfouit les mauvaises herbes, mais ramène en surface des horizons profonds, moins humifères, plus érodibles et riches en graines d'adventices enfouies le cycle précédent. La pression de la charrue sur le « fond de labour » ($p=3 \text{ kg/cm}^2$) écrase la macroporosité et crée une « semelle de labour » qui ralentit le drainage et empêche l'enracinement profond. En réalité, c'est dans la forêt qu'on trouve les meilleures conditions physiques de stabilité structurale du sol, d'agrégation, d'infiltration, d'enracinement profond et pourtant on n'y a jamais passé la charrue (Roose, 1981). Les paysans ne s'y trompent pas qui, traditionnellement défrichent, brûlent la forêt et sèment directement du riz, du manioc, des ignames, du maïs, etc, sans travailler le sol (ex en Côte d'Ivoire et à Madagascar).

D'où l'idée de réduire le travail du sol : travail à la dent limité à la ligne de plantation qui respecte la litière sur le reste de la surface, ou semis direct sous la litière, sous les résidus de culture, sous les émondes des haies vives ou sous des plantes de couverture et des adventices brûlées aux herbicides de contact. Pour se rapprocher du système forestier, on combine la culture de plantes à racines profondes (arbustes légumineuses) qui ramènent les nutriments à la surface du sol, à des plantes basses qui couvrent bien la surface du sol ou laissent suffisamment de résidus pour couvrir 80 % de la surface du sol.

Il existe de nombreuses raisons pour justifier la pratique des feux de brousse qui parcourent des espaces surpâturés, détruisent quantité de nuisibles et de plantes peu appétantes envahissant les parcours, régénèrent les herbages, recyclent les nutriments piégés dans les vieilles plantes desséchées, minéralisent des matières organiques et augmentent d'une unité le pH de l'horizon superficiel ce qui rend assimilables le phosphore et d'autres oligo-éléments. En desséchant la surface du sol, le feu a rendu le sol hydrophobe et augmenté le ruissellement lequel peut être utile ailleurs, par exemple dans les rizières des bas-fonds de Madagascar.

Par contre, les feux répétés ont un impact négatif sur la biodiversité (destruction des jeunes semis, développement sélectifs des arbres pyrophiles), sur les MO, l'azote et le carbone du sol et par conséquent sur toutes les propriétés du sol liées à la MO du sol. Les surfaces brûlées augmentent temporairement le ruissellement et sa charge solide jusqu'à ce que la nouvelle végétation ait recouvert les surfaces brûlées. L'époque et l'intensité du feu sont très importantes. Les feux précoces parcourent rapidement la surface du sol sans

détruire les souches des graminées pérennes et sans s'acharner sur les troncs des arbres. La surface du sol reverdit avant même le retour des pluies (Roose, 1978). Par contre un feu tardif va brûler les souches des graminées, les branches et semis des jeunes arbres: il va réduire pour longtemps le couvert végétal qui s'éveillait à la nouvelle saison des pluies.

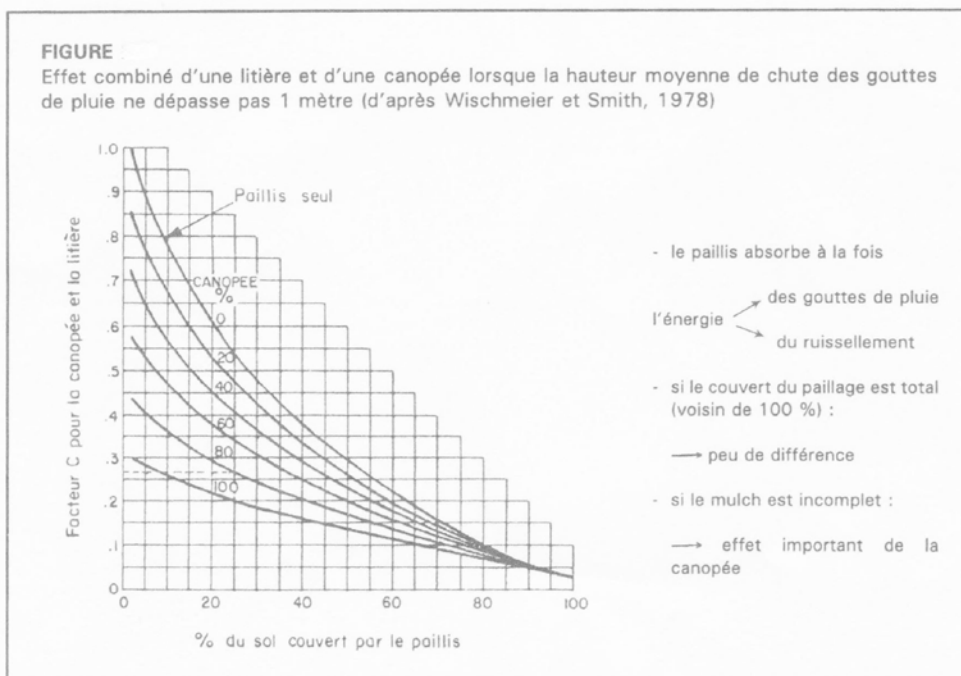
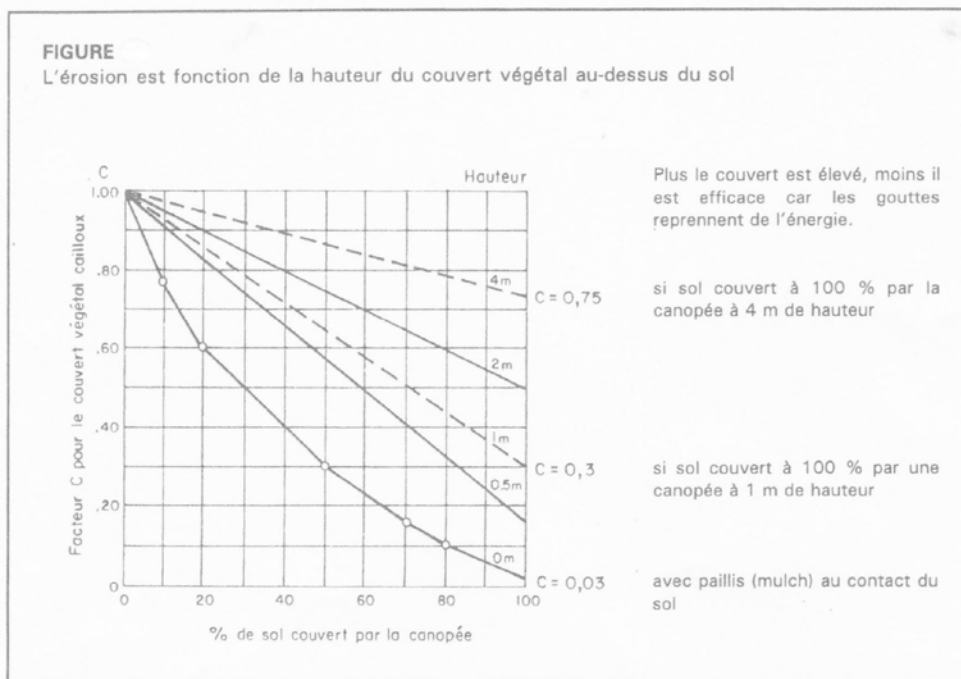


Figure 4.3. Influence de la hauteur de la couverture du sol sur les risques d'érosion (d'après Wischmeier et Smith, 1978).

Le pâturage par les troupeaux d'ovins et de caprins (2 à 3 kg/cm² de pression des sabots) et surtout par les vaches et les chevaux (6 à 7 kg/cm² de pression sous les sabots) entraîne la réduction sévère du couvert végétal, le tassement des chemins qu'ils empruntent et un ruissellement abondant des parcours se traduisant souvent par le ravinement des drailles et des terres cultivées en aval (Roose, 1994).

En conclusion, quelle que soit la pente, la fragilité du sol, les techniques culturales et le type de végétation, le couvert végétal des litières assure la meilleure protection de l'eau et des sols du moment qu'il couvre plus de 80 % de la surface. Mais là où le sol est partiellement nu pendant la saison des pluies, il est souhaitable de compléter l'aménagement par des structures horizontales (cordons de pierres, haies vives, bandes d'arrêt) orientant le travail du sol selon les courbes de niveau.

C/ La pente : inclinaison, longueur, forme

Dès l'origine de l'agriculture, la topographie (inclinaison, longueur et forme des versants) a été perçue comme l'un des principaux facteurs de l'érosion. D'où les nombreuses techniques de réduction de la pente (terrasses en gradins ou progressives), de la longueur des champs (gros billons, banquettes, cordons de pierres, haies vives, bandes enherbées, labour et billonnages en courbes de niveau), et forme de la pente (terrasses progressives et talus limitant les parcelles). Plus récemment, on s'est aperçu que la position topographique dans le paysage (en particulier montagneux) était parfois plus importante que la pente elle-même (Heusch, 1970 ; Roose, 1994). En témoignent les ravines remontantes à partir de la résurgence du ruissellement hypodermique au niveau d'une roche imperméable comme des marnes, des calcaires denses, des schistes ou des basaltes. Par ailleurs, l'existence de ruissellement et d'érosion intense sur des glacis en pente douce (1-3 %) indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une pente forte pour déclencher l'érosion (ex. en zone des plateaux soudano-sahéliens) (Fournier, 1967 ; Roose, 1994).

De nombreux modèles (Ramser, Saccardy, Bugeat, Woodruff, Heusch, Hudson) ont tenté d'établir empiriquement la dénivelée des talus ($dh = 0,3$ à $2m$) en fonction de l'inclinaison de la pente (2 à 50 %).

Dans le modèle USLE, le facteur topographique tient compte essentiellement de la longueur de pente sans obstacle pour le ruissellement (L en pieds) et surtout de l'inclinaison de la pente (S en %) (Wischmeier et Smith, 1978)

$$SL = (0,76 + 0,53 S + 0,0076 S^2) \times \sqrt{L}$$

SL varie de 0,1 pour des glacis de <2 %, à 1 pour une pente de 10 % et 22m de long, à 20 pour des pentes de 50 %. (voir figure 4.4). D'après Heusch (1986) et Hudson (1973), lorsque la pente dépasse 25 %, l'énergie du ruissellement dépasse l'énergie des pluies. En Afrique, les comparaisons de l'effet de longueur et inclinaison des pentes varient beaucoup en fonction de l'histoire des parcelles, des systèmes de culture, du climat, de la rugosité et du type de sol (Roose, 1994).

En absence de raison scientifique de choisir tel ou tel modèle, nous suggérons de nous appuyer sur le graphique traduisant l'effet combiné de la pente et de sa longueur.

Vu les incertitudes sur l'effet de la topographie, nous proposons la solution de bon sens suivant : déterminer la longueur de pente au-delà de laquelle l'érosion se traduit par des rigoles sur chaque segment fonctionnel du paysage et retenir la hauteur des talus (dh) en fonction de la pente (dh = 0,3 m sur glacis de <3% et dh < 2,0 m sur 25 à 50 % de pente) du système de culture et du climat. Nous déconseillons des talus plus élevés en montagne, d'une part car ils risquent de glisser en masse s'ils ne sont pas stabilisés par des racines d'arbres, et d'autre part pour faciliter l'exploitation des productions fourragères sur les talus (animaux au piquet). Par contre, on peut envisager de doubler la largeur des terrasses théoriques en prévoyant au centre un gros billon isohypse bien couvert par des arbustes (caféiers ou fruitiers) et par des cultures rampantes (patates douces, arachides, légumineuses fourragères, etc) (Roose, 1994) : si nécessaire, il sera facile de transformer ce billon en talus permanent stabilisé par une haie vive. Enfin au Rwanda des pentes de 60 à 80 % sont cultivées sur des microterrasses en escalier dont le talus est suffisamment bas pour que la zone cultivée reste dans l'horizon humifère (Nyamulinda, 1989).

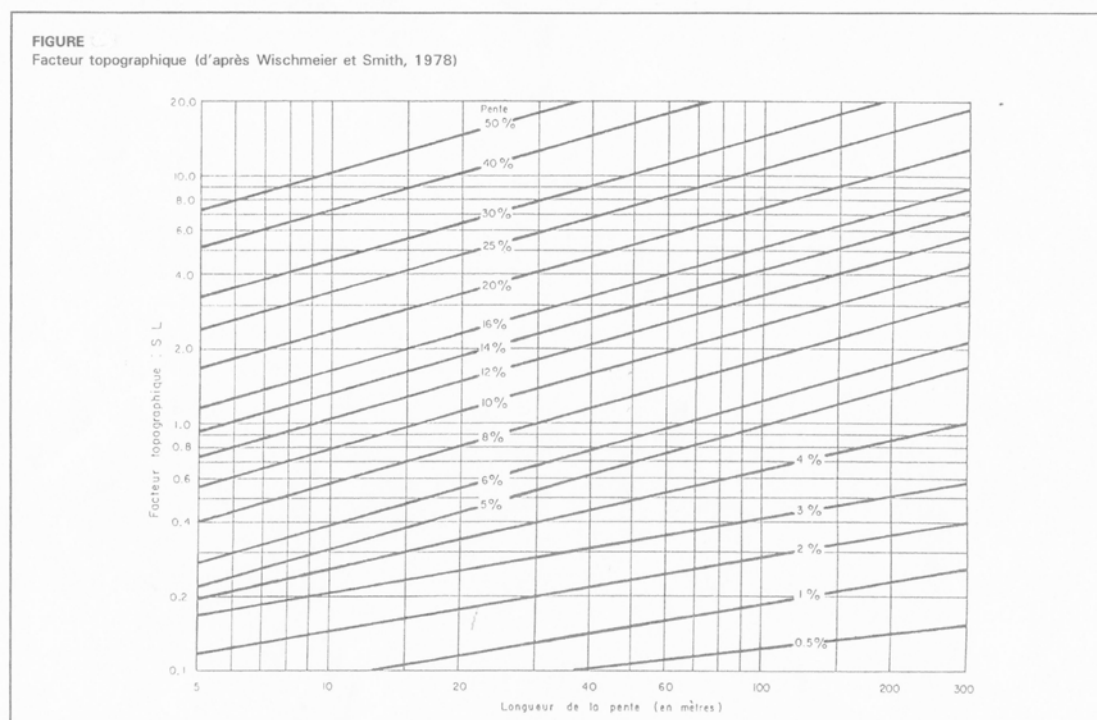


Figure 4.4 .Facteur topographique en fonction de l'inclinaison et de la longueur de pente d'après Wischmeier et Smith, 1978.

D. L'érodibilité des sols tropicaux (K= 0,01 à 0,70)

La résistance des sols à la battance des pluies se mesure sur des parcelles en jachère nue travaillées depuis plus de 3 ans sans apport de MO. L'indice retenu, K, est le rapport entre l'érosion sur sol nu et l'indice de l'érosivité :

***K = 0,01 pour les sols les plus résistants** (sols caillouteux, argileux saturés en calcium, riches en R_2O_3 , ou en MO),

*** K = 0,25 à 0,40 pour les sols moyennement fragiles**, riches en argile gonflante, en micas, saturés en K ou Mg,

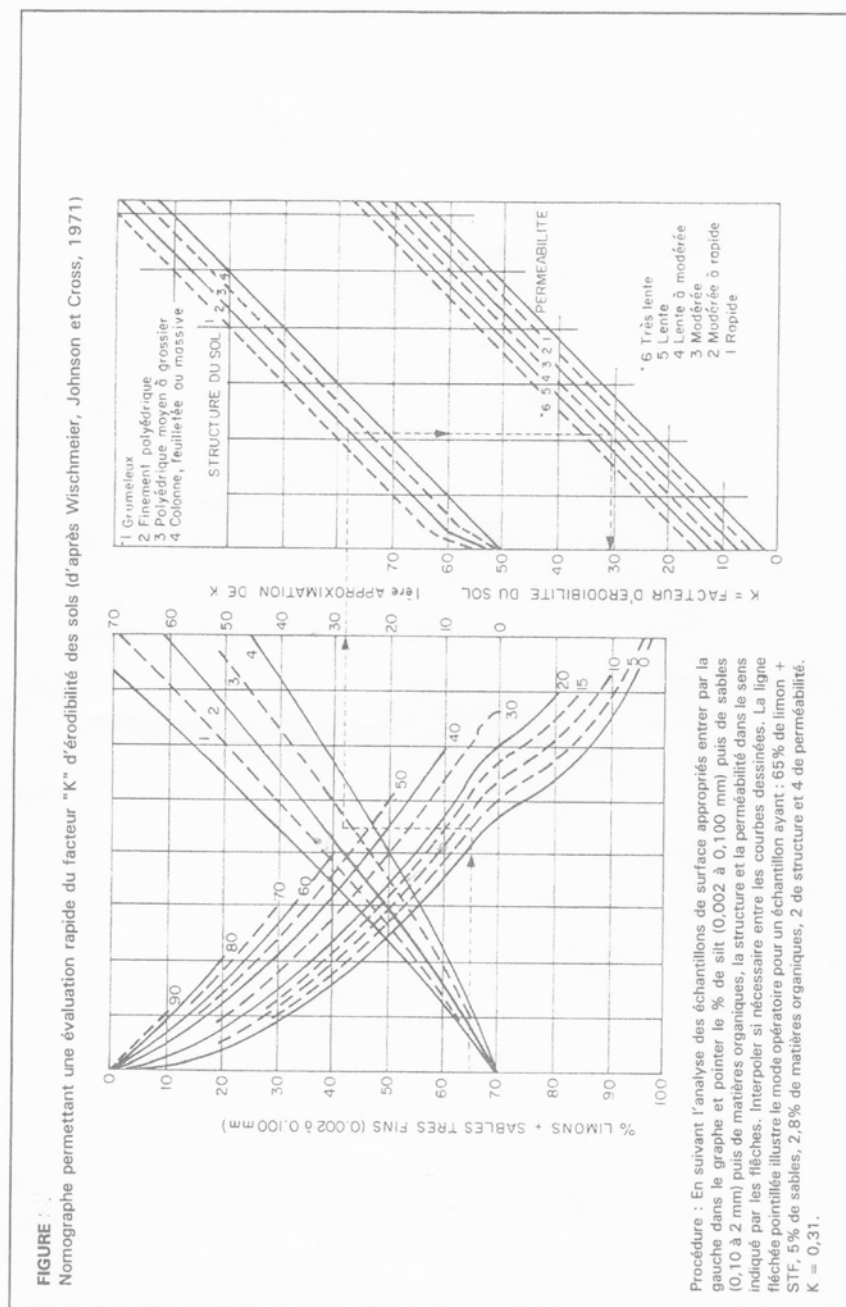
*** K= 0,50 à 0,70 pour les sols les plus fragiles**, riches en sodium, en limons et sables fins, pauvres en MO, fer et alumines (Roose et Sarrailh, 1989).

Plus les sols sont riches en cailloux, en MO et argile saturée de calcium, plus le taux d'agrégats stables est élevé, plus la couverture pédologique est résistante à l'agressivité des pluies. Plus les sols sont riches en sables fins et limons, en sodium échangeable ou en sel sodique, plus les agrégats sont instables : le travail fin de la surface du sol aboutit rapidement à la formation d'une pellicule de battance, peu perméable, au développement du ruissellement et à l'érosion en nappe.

L'amélioration de la structure du sol et de la stabilité des agrégats est difficile car l'apport de MO est rapidement minéralisé dans ces milieux chauds et humides : un sol sableux perd la moitié de son humus en 4 ans, et un sol argileux en dix ans (Roose, 1994). Pour améliorer le stock de carbone et les propriétés qui en dépendent, il faut sélectionner des rotations produisant beaucoup de biomasse, joindre des arbres et gérer ces litières à la surface du sol : les vers de terre, termites et autres animaux se chargeront de les transformer en humus stable et de les mélanger avec les horizons de surface. Par ailleurs, on peut réserver les sols les plus stables aux cultures sarclées peu couvrantes et les sols fragiles aux cultures pérennes (légumineuses fourragères, arboriculture, prairies).

Sur les pentes faibles (<15%), les taux de MO, d'argile, de limons et de sables fins (silt), les sesquioxydes de fer et d'alumine, le taux de Ca^{+} et de cailloux, déterminent l'érodibilité du sol à la battance et à l'érosion. Sur les pentes fortes, la stabilité des agrégats a moins d'importance car ils sont entraînés par le ruissellement dans les rigoles ou par les mouvements de masse (Voir Martinique). C'est le taux de saturation du sol avant les pluies qui règle le ruissellement et l'érosion linéaire ou en masse. La capacité moyenne de stockage en eau varie avec l'infiltration et la texture du sol. Pour mouiller 10 mm de sol riche en argile kaolinite, il faut environ 1 mm de pluie, 4 mm de pluie sur argile gonflante (montmorillonite) et 10 mm sur la matière organique. D'où l'intérêt de maintenir le meilleur taux de carbone possible à la surface du sol (donc l'agrégation et l'infiltration) par des systèmes de culture qui produisent beaucoup de biomasse, une abondante litière et des techniques culturales qui perturbent le moins possible cette précieuse litière (Roose, 1994).

Figure 4.5. Nomographe permettant d'évaluer rapidement le facteur K d'érodibilité des sols à partir du taux de MO., de la texture (limons et sables fins, sables grossiers), de la structure et de la perméabilité.
(D'après Wischmeier, Jonhson et Cross, 1971.)

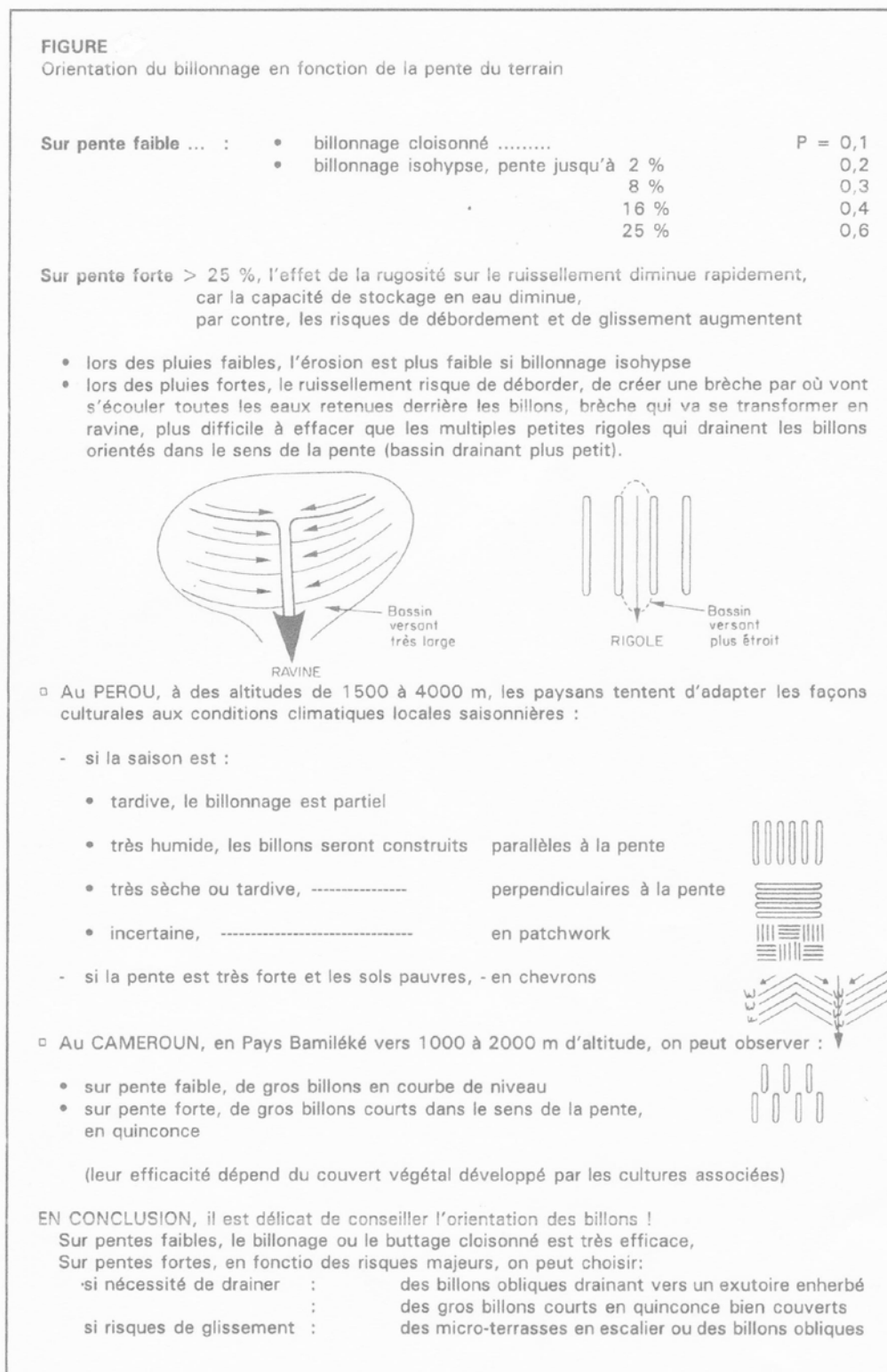


E. Les pratiques culturales antiérosives (P = 1 à 0,1)

L'influence des banquettes, terrasses, fossés, haies vives, etc, est évaluée à partir des variations de longueur ou d'inclinaison de la pente (SL). Il s'agit ici des techniques de préparation du sol avant le semis.

Le **labour** a temporairement une influence favorable sur l'infiltration jusqu'à la formation d'une pellicule de battance : il suffit d'une averse de 40 à 120 mm selon la stabilité des mottes. Un **labour grossier ou un billonnage** suivant les courbes de niveau améliorent la rugosité du sol qui va stocker les eaux et les sédiments. Le facteur P jusqu'à 10 % de pente varie de 0,1 à 0,7 selon la pente. Au delà de 15 à 25% de pente et de 30 à 100 m de longueur, le facteur P du billonnage en courbe de niveau tend vers 1 et la rugosité de la surface perd de son efficacité. Sur les glacis en pente faible, le **billonnage cloisonné** peut réduire à 1/10 le risque d'érosion : cependant la surface du sol se dégrade (accumulation de sables stériles, perte des MO par le ruissellement) en même temps que les MO du sol minéralisent rapidement. En 1988, Roose et Cavalie ont testé au simulateur de pluies l'efficacité des techniques de préparation du sol et de gestion des résidus de culture dans la région de Toulouse. Sur des pentes de 25 %, les seules techniques qui réduisent les risques de ruissellement et d'érosion sont celles qui laissent à la surface du sol une part importante de litière (résidus de culture) : les labours, le sous-solage, différents modes de sarclage n'ont eu qu'un impact temporaire sur le ruissellement et l'érosion.

Figure 4.6. Orientation du billonnage en fonction de la pente du terrain.



Récemment en Afrique, « le labour de conservation » qui préserve au moins 30 % de sol couvert par les résidus de culture et les adventices, et surtout « **le semis direct sous litière** » (découpage d'un sillon étroit où sont enfouis engrais, pesticides et graines) ont été testés avec des succès variables en fonction de l'usage traditionnel des résidus de culture (vaine pâture) et des rotations. En zones soudano-sahéliennes du Mali et du Cameroun, grâce aux résidus laissés en surface, le ruissellement et l'érosion ont été profondément réduits, mais le rendement en maïs a diminué de 10 à 25 %. (Boli, Diallo et Roose, 2017). Malheureusement, la tradition de vaine pâture qui permet au bétail de circuler en liberté dans tous les champs dès que la récolte principale a été réalisée ... et les feux de brousse, réduisent les chances de garder le sol couvert dans cette zone où les résidus de culture constituent la principale source de fourrage en saison sèche.

4.4. La lutte contre le ruissellement et l'érosion en nappe

La lutte contre l'érosion n'est pas achevée lorsqu'on a structuré le paysage (terrasses, banquettes, fossés etc) : elle est bien plus efficace lorsqu'on développe des systèmes culturaux intensifs couvrant parfaitement la surface du sol et améliorant la résistance des agrégats du sol.

Couvrir le sol. Il s'agit avant tout de développer une agriculture couvrant la surface du sol le mieux possible pendant toute la saison culturale : semis dense et précoce, cultures mélangées, plantes rampantes entre les plantes dressées, légumineuses intercalaires, gestion des adventices herbicides et couchées sur place, gestion des résidus de culture en surface, mulch, agroforesterie, mulch de cailloux...La fertilisation raisonnée organique et minérale peut accélérer la croissance végétale et le recouvrement du sol par sa biomasse.

Améliorer la porosité et la structure du sol. Le labour, le binage superficiel et le sarclage du sol améliorent temporairement la capacité d'infiltration du sol, mais après quelques averses (P=40 à 120 mm), le sol nu s'encroûte et le ruissellement se développe de même que l'érosion. Aujourd'hui, on tend à réduire le travail du sol à la ligne de plantation et laisser couvert le reste de la surface : la faune qui vit de la litière va perforer la croûte et assurer une bonne infiltration. L'apport de MO en surface et l'activité des vers sont essentiels pour assurer une bonne agrégation de l'horizon de surface du sol. Le problème, c'est qu'on ne dispose jamais assez de MO de bonne qualité. Dans certains cas il est possible d'améliorer la texture sableuse du sol par un sous-solage profond ou en rapportant des sédiments fins déposés au fond des barrages.

Réduire la longueur et l'inclinaison de la pente. Les talus enherbés, les haies vives, les cordons de pierres et les terrasses sont plus efficaces que les fossés et banquettes de diversion pour ralentir le ruissellement et réduire l'érosion car ils réduisent à la fois la longueur et l'inclinaison de la bande cultivée. De plus ils développent une succession de bandes concaves qui bloquent les sédiments. (Roose, 1986). D'après le modèle USLE, l'érosion dépend de la racine carrée de la largeur du champ, mais surtout du carré de l'inclinaison : on a donc avantage à construire des talus plutôt qu'à creuser des fossés, mais il

faut protéger particulièrement le pied du talus par un enherbement (si possible une légumineuse fourragère).

Améliorer la rugosité de la surface du sol. Sur les pentes de <15%, l'orientation suivant les courbes de niveau du labour et du billonnage peut stocker l'eau des premières averses, mais après 40 à 120 mm de pluie, les rugosités sont décapées, les croûtes de battance s'étendent et le ruissellement se développe et s'engouffre dans les zones légèrement plus basses, formant une ravine griffant l'ensemble du versant. On peut voir dans l'encadré 1 comment diverses sociétés paysannes adaptent l'orientation des billons en montagne en fonction des risques climatiques (Roose, 1994). Par contre, la rugosité des résidus de cultures, les adventices séchant en surface et le paillage sont efficaces et durables pendant des mois voire plusieurs saisons culturales (Khamsouk et Roose, 2003). Dans la réalité, c'est la combinaison des facteurs de résistance qui parvient à réduire la nocivité de l'énergie des pluies tombant sur les sols cultivés.

En conclusion, La lutte antiérosive ne consiste pas seulement à structurer le paysage en gérant le ruissellement excédentaire, mais essentiellement en développant des systèmes de culture (techniques culturales et association de plantes cultivées) de telle sorte que le sol soit toujours bien couvert dans l'espace et dans le temps. Tout cela exige des efforts importants des paysans qui ne l'acceptent que s'ils y trouvent un réel bénéfice (moins de travail, travail plus facile et surtout plus rentable et durable).

Enfin, il ne suffit pas de garder en place la terre reçue des anciens: à quoi bon stabiliser une terre épuisée ? Il faut restaurer sa fertilité et sa productivité afin que les efforts fournis soient payants. Or l'expérience a montré que les investissements en engrais, MO et divers apports en fumier rapportent plus sur les bonnes terres que sur les terres épuisées (Brochet, Lilin, Roose, 2017 ; Rishirumuhirwa et Roose, 2017). Ce n'est que sous la pression démographique et le manque de terre que les paysans acceptent d'investir dans les terres épuisées... sinon ils les laissent en jachère.

4.5. Bibliographie

Boli Z., Diallo D., Roose E., 2017. Potentiel du semis direct et des matières organiques pour restaurer durablement la productivité des sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun et du Sud-Mali. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » Eds Roose E., IRD Editions, Marseille : 367-376.

Brochet M., Saintil Clossy, Lilin Ch., Roose E., 2017. Aménagements hydroagricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols. In Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Edsc Roose, Edition IRD Marseille : 565-580.

Fournier F., 1967. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains*, 12, 1 : 5-53.

Khamsouk B., Roose E., 2017. Effets de la gestion des résidus de cultures sur un sol brun tropical volcanique. Tests sur divers systèmes intensifs de cultures d'exportation sous pluies naturelles et simulées en Martinique. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux

et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie ». Eds E.Roose, IRD Editions, Marseille: 223-234.

Nyamulinda V., 1989. Méthodes autochtones de conservation des sols dans les hautes terres de Ruhengeri au Rwanda. *Bull. Agric.Rwanda*, 3 : 147-15

Pomel S. et Ha PHAM QUANG, 2005. Indicateurs de risque d'érosion et les états de surface des sols du Nord Vietnam. In « Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols ». Les Actes des Journées Scientifiques Régionales du Réseau Erosion et GCES de l'AUF. Antananarivo, Madagascar : 102-106.

Rishirumuhirwa Th., Roose E., 2017. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. In « restauration de la productivité de sols tropicaux et Méditerranéens » Eds Roose E., IRD Editions, Marseille : 211-222.

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 expérimentales. Paris, Travaux et Documents de l'ORSTOM n°78, 108 p.

Roose E., 1978. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux tropical complexe issu de granite sous une savane arborescente du Centre Burkina Faso (Gonsé, 1968-1974). *Cahier ORSTOM Pédol.*, 16, 2 : 193-223.

Roose E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Paris, Travaux et Documents ORSTOM, n° 130, 570 p.

Roose E., 1986. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables? Analyse de leur efficacité en milieu paysan africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. *Cahier ORSTOM Pédol.*, 22, 2 : 197-208.

Roose E., Sarrailh J.M., 1989. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahier ORSTOM Pédol.* 25, 1:7-30.

Roose E., Sabir M., Laouina A., 2010. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Editions, Marseille, 343 p.

Sabir M., Barthès B., Roose E., 2004. Recherche d'indicateurs de risque de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15, 1 : 105-110.

Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Handbook n°537, 58 p.

Chapitre 5. L'érosion linéaire en rigoles et ravines

5.1. Les causes et les processus de ravinement

Lorsque les pluies sont abondantes et la pente forte, le ruissellement en nappe se concentre en filets entre les touffes végétales, prend de la vitesse et développe une énergie capable de creuser des griffes profondes de quelques centimètres, puis des rigoles de 10 à 50 cm de profondeur avec des zones d'érosion et des zones de dépôts des particules les plus grossières. Ce sont les forces de cisaillement de l'eau chargée de sables et graviers qui arrachent les agrégats, des mottes et des cailloux au fond et sur les flancs des rigoles. La résistance d'un profil de sol au ruissellement diffère donc de « l'érodibilité d'un sol à la battance » des gouttes de pluie à la surface du sol.

La naissance du ruissellement peut s'expliquer par trois théories (Roose, 1994) :

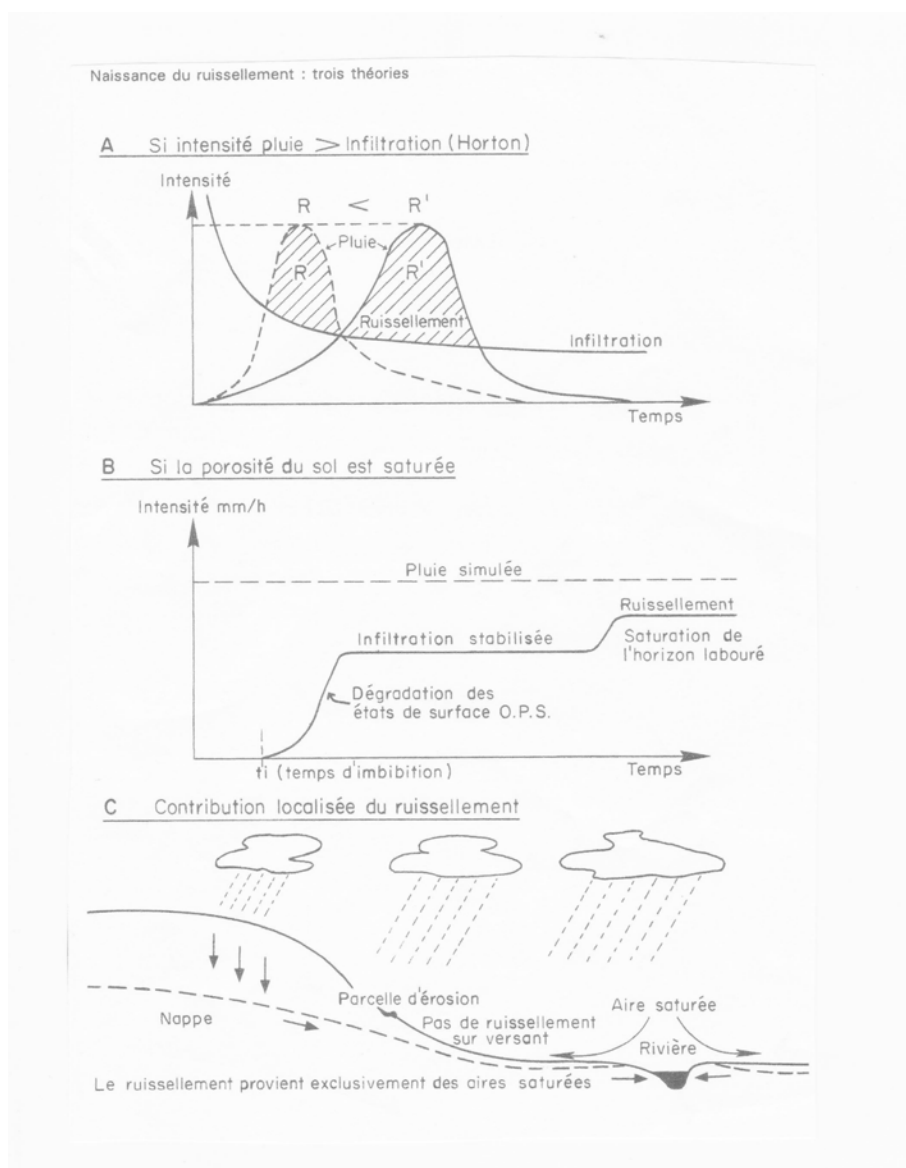
***Selon la théorie de Horton sur l'intensité des pluies.** *Le ruissellement se développe quand l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol. Comme la capacité d'infiltration du sol décroît au cours des pluies, à mesure que la porosité de la surface du sol se sature ou se referme (croûte de battance), il arrive un moment où l'intensité de la pluie dépasse celle de l'infiltration (= le temps d'imbibition) : l'excédent circule en filets qui acquièrent une énergie capable d'entailler le sol et de charrier des particules grossières telles que des sables et des graviers. Cependant les hydrologues ont montré qu'il est rare d'obtenir une bonne corrélation entre le volume ruisselé dans un bassin versant et l'intensité des pluies.*

***Selon la théorie de la saturation du sol :** le ruissellement peut naître lors de pluies peu intenses, mais suffisamment longues pour saturer les horizons superficiels du sol. Au cours d'une pluie simulée de longue durée, il advient que le ruissellement se stabilise après quelques dizaines de minutes, puis augmente à nouveau jusqu'à atteindre un nouveau plateau d'infiltration stabilisé très faible: c'est le cas de pluies de plus de 100 mm/h sur un horizon possédant une « semelle de labour ». Le premier plateau correspond à la capacité d'infiltration de la pellicule de battance à la surface du sol et le second à la très faible capacité d'infiltration de la semelle de labour. Toute goutte d'eau qui tombe sur ce milieu saturé ruisselle, quelle que soit l'intensité de la pluie.

***Selon la théorie de la contribution partielle de la surface.** Dans la nature, le ruissellement ne se développe pas en même temps sur toute la surface d'une parcelle ou d'un bassin versant mais seulement sur une partie plus humide, plus tassée (chemins), couverte de

croûtes de battance ou au fond d'une vallée où la nappe phréatique, nourrie par tout le bassin, va saturer une zone marécageuse (Cosandey et Robinson, 2000).

Figure 5.1 Trois théories expliquant la naissance du ruissellement



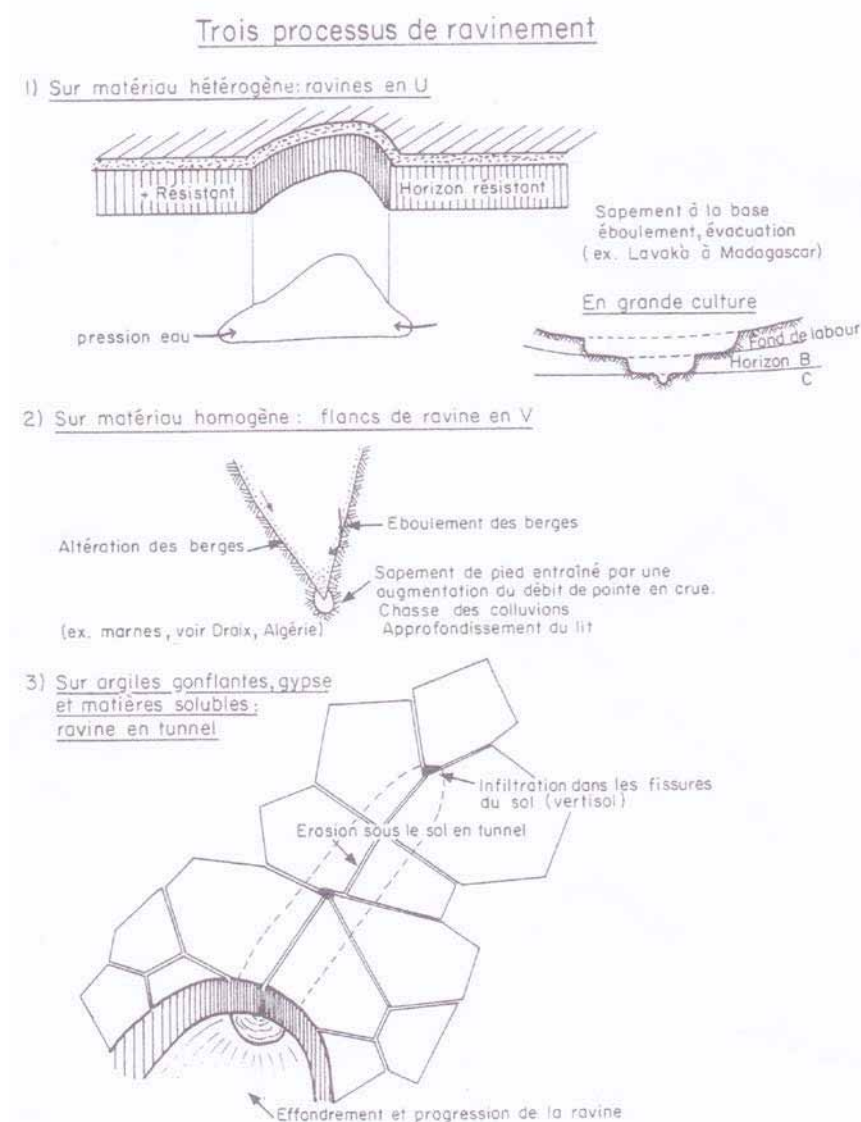
En fonction de l'origine du ruissellement, la lutte antiérosive devra s'organiser différemment. S'il provient du tassement ou de la formation d'une croûte de battance, il faudra couvrir le sol (paillage, mulch de cailloux, plantes de couverture, résidus de culture, arbres) ou évacuer latéralement l'excès d'eau dans des fossés ou des chemins d'eau. Si le sol profond est compact et saturé, il faudra améliorer le drainage par un sous-solage ou des drains artificiels.

5.2. Les formes et les indicateurs d'érosion linéaire

Les griffes et rigoles. L'érosion linéaire dépend du volume ruisselé et de son énergie ($E = 1/2 mv^2$). Celle-ci décape des griffes (canaux de quelques centimètres) ou des rigoles (profondeur de 5 à 30 cm) à parois inclinées ou verticales dans la partie la plus meuble du profil pédologique, puis s'étale lorsqu'elle atteint un niveau plus cohérent (semelle de labour, couche argileuse tassée ou enrichie en fer, calcaire ou silice, roche altérée).

On parle de « **nappe ravinante** » lorsque les zones creuses ne dépassent pas 20 cm d'épaisseur bien que leur largeur peut atteindre plusieurs mètres. Dès que la vitesse du ruissellement diminue (réduction de la pente, augmentation de la rugosité de la surface, labour grossier, paillage, litière, touffes d'herbes, racines traçantes), ces rigoles superficielles s'estompent en abandonnant un mince cône de déjection sableux.

Figure 5. 2. Trois processus de ravinement.



Les ravines et le ravinement généralisé. On parle de ravine lorsque le creux des rigoles dépasse 50 cm de profondeur et ne peut plus être effacé par les techniques culturales habituelles. On distingue « **les petites ravines** » dont le lit et les versants sont encombrés de végétations herbacées ou arbustives qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques (petits seuils en grillage et plantation d'herbes au centre et d'arbustes au pied des berges).

Les ravines moyennes taillent la couverture pédologique jusqu'à la roche altérée de telle sorte qu'il faut d'abord fixer le fond de la ravine et y accumuler 50 cm de sédiments avant de les végétaliser. Par contre dans **les grandes ravines torrentielles** qui peuvent s'étendre sur plusieurs km, le canal central est couvert de gros blocs rocheux, témoins du charriage important de pierres qui empêchent la fixation de toute végétation. Ces fonds mobiles doivent être fixés solidement par des seuils bétonnés ainsi que des épis en gabions (Lilin et Koohafkan, 1987).

Certaines ravines ont des berges en V à pente constante jusqu'au fond : c'est le cas sur les matériaux tendres et homogènes comme les marnes, argilites, schistes et grès tendres. D'autres ont des berges verticales car elles traversent des couches plus cohérentes (horizons B enrichis en argile ou en fer ou cuirasse ferrugineuses) : c'est le cas des « **lavaka** » fréquentes à Madagascar, qui évoluent par effondrement des flancs sous la pression de la nappe phréatique. Enfin dans certains milieux semi-arides où on trouve des argiles gonflantes (vertisols, marnes gypseuses), « **des ravines en tunnel** » progressent par dissolution du gypse, puis effondrement des cavités érodées par les eaux de drainage circulant dans les fissures du sol.

Sur les versants des collines, ces ravines sont hiérarchisées et leur bassin versant bien défini. Leur rôle est d'évacuer rapidement les excès d'eau de ruissellement. Si on tente de les reboucher, un autre drain va se développer à côté de l'ancienne ravine rebouchée. Il faut donc d'abord réduire le ruissellement sur son bassin versant et stabiliser la ravine avant de réduire son volume.

La perte en terre d'une zone creusée par des rigoles atteint plusieurs dizaines de t/ha/an et l'érosion d'une ravine 100 à plus de 300 t/ha/an : la présence de ces indicateurs montre une nette augmentation des risques de ruissellement et d'érosion.

Le stade ultime de l'érosion linéaire d'une colline est appelé « **badlands** » (= mauvaises terres) ou plus scientifiquement « ravinement généralisé » quand toute la surface initiale de la colline a été décapée. Cette forme est fréquente sur marnes après défrichement, cultures et pâturages extensifs, surtout si elles sont riches en gypse et autres sels solubles. Sur les badlands tous les processus d'érosion sont présents, mais le ravinement domine largement.

5.3. Les effets de l'érosion linéaire

L'érosion en rigoles décape localement une tranche de sol de façon non sélective. Quand le labour efface ces rigoles, il étale sur toute la surface ces matériaux grossiers et

accélère la disparition de l'horizon humifère. La charrue va dorénavant gratter dans l'horizon sous-jacent et remonter des matériaux plus pauvres en MO, mais souvent plus riches en argiles ou en cailloux. Il reste une ondulation de la surface du champ qui va servir de drain pour les pluies suivantes et assécher le champ.

Le décapage non sélectif par l'érosion linéaire a un effet négatif sur le potentiel de production, mais cette diminution est dix fois plus faible que pour l'érosion en nappe sélective. Par exemple les essais de Mbissiri, Cameroun, ont montré qu'on perdait 40% du rendement en maïs si on décapait mécaniquement 40 mm de sol ou si l'érosion en nappe atteignait 4 mm. En effet celle-ci érode sélectivement les particules fines (MO, argiles et limons) les plus fertiles.

Il arrive sur les zones concaves des collines que les rigoles se rassemblent pour former une ravine (fréquent au Rwanda) : il n'est plus possible de l'effacer par de simples techniques culturales, mais la ravine va laisser une ondulation du versant qui va rassembler le ruissellement des pistes, des parcours et des champs en amont. La surface des ravines constitue une perte de surface cultivable (SAU) qui va s'étendre latéralement. En outre les ravines constituent une gêne pour la circulation du bétail, des véhicules et des outils agricoles : elles fragmentent la surface du champ à cultiver.

En aval, la ravine dépose une masse de matériaux non sélectionnés souvent sableux ou caillouteux qui dégradent les vallées. Les grandes ravines rabattent la nappe phréatique et assèchent les champs. L'érosion en ravine est donc particulièrement nocive pour le développement d'une agriculture moderne, intensive et durable.

5.4. Les facteurs modifiant le ravinement

L'érosion linéaire dépend de la masse du ruissellement (M) et du carré de sa vitesse (V^2) au niveau des parcelles : $E=1/2 M \times V^2$.

Au niveau des bassins versants, $E= \frac{1}{2} M \times G \times H$ où G est la force d'attraction et H la différence d'altitude du sommet à la base du bassin.

Le volume du ruissellement dépend de l'intensité et du volume de la pluie, de la surface du bassin drainé, de l'humidité du sol avant la pluie, de l'état de la surface du sol (ouvert, fermé, couvert, tassé), de l'activité de la faune du sol, de la pente et de la rugosité du sol, du coefficient de ruissellement de chaque zone du bassin.

La vitesse du ruissellement dépend de la pente, de la rugosité du canal, de l'épaisseur de la lame ruisselée et de la hauteur de chute de l'eau dans la ravine.

On ne peut modifier l'intensité des pluies, mais bien le couvert végétal et la **rugosité du fond de ravine** par des seuils perméables (haies, gabions, cordons de pierres) ou non (béton pour stocker plus d'eau). Par ailleurs, on connaît des versants

qui reçoivent les vents humides et les adrets généralement plus secs et moins protégés par la végétation.

Le couvert végétal protège la surface du sol de la battance des pluies, prolonge la période de forte infiltration et réduit le volume ruisselé. Les litières entretiennent les activités perforatrices de la faune et absorbent une grosse partie de l'énergie de la pluie et du ruissellement. Enfin, les adventices, les racines superficielles et les touffes des graminées augmentent la rugosité du sol et ralentissent le ruissellement. La canopée et les litières absorbent une partie des pluies (1 à 10 mm), mais cela ne représente qu'une part négligeable des fortes averses, celles qui causent le plus de ruissellement et d'érosion. Dans les ravines elle-même, les touffes d'herbes et d'arbustes peuvent capter une bonne part des sédiments grossiers et ralentir le ravinement (Rey, 2002). Par ailleurs, le pâturage des parcours entraîne une réduction du couvert végétal, le tassement des premiers cm du sol et une augmentation sensible du ruissellement (Sabir et al., 1996 ; Roose, 1994). En montagne, les jachères pâturées, le matorral et les parcours sont généralement une source de ruissellement abondant causant le ravinement des champs cultivés en aval (Laouina et al., 2008).

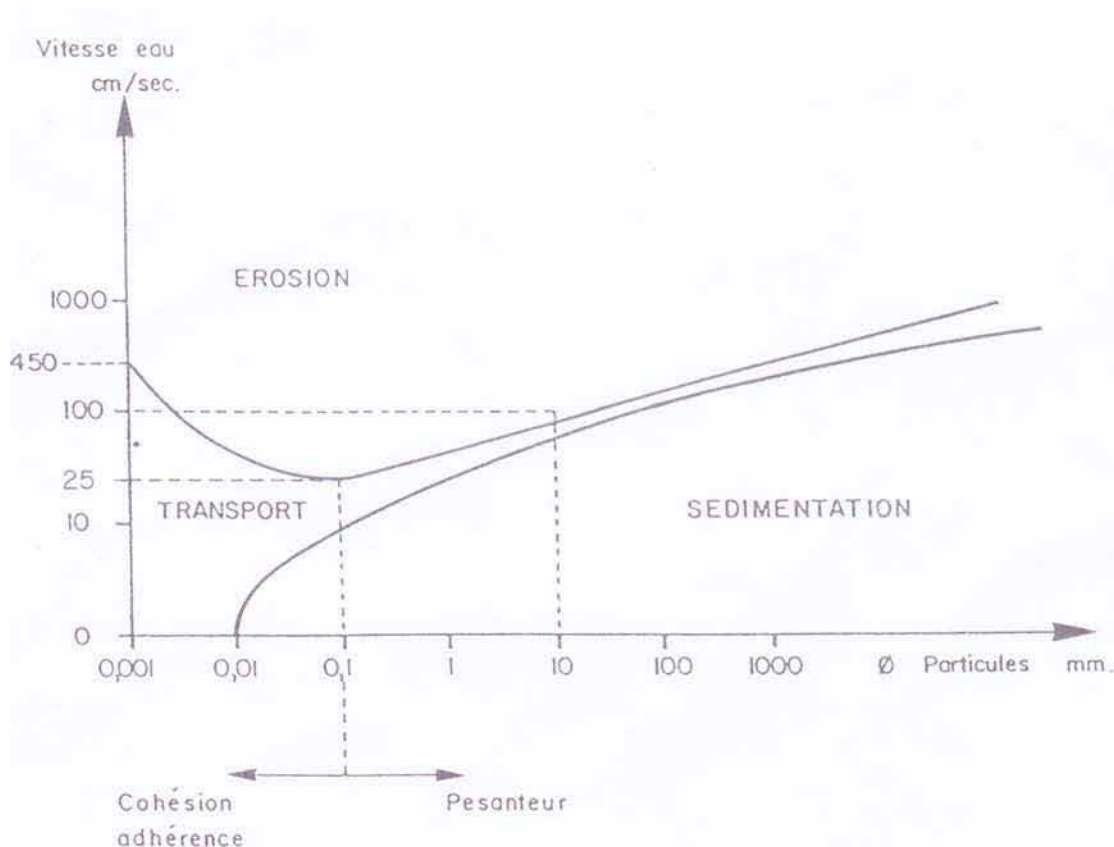
Le sol intervient à divers niveaux dans la naissance et le développement du ruissellement. L'humidité du sol augmente le ruissellement et réduit sa résistance à l'abrasion. La rugosité de sa surface, fonction des techniques culturales, réduit la vitesse du ruissellement et augmente le stockage de l'eau avant le début du ruissellement (temps d'imbibition). Le billonnage cloisonné et le maintien de résidus de culture, des adventices ou d'un mulch peut aussi réduire considérablement le ruissellement issu d'un champ. La texture d'un sol peut aussi intervenir. On pense communément que les sols sableux sont plus perméables que les sols limono-argileux, sauf si ceux-ci sont bien structurés. La stabilité de la structure a une incidence sur la résistance à la battance donc sur la pluie d'imbibition. Les cailloux peuvent avoir deux influences opposées. Posés sur des surfaces ouvertes, les cailloux vont protéger le sol de la battance et prolonger l'infiltration. Si par contre les cailloux sont inclus dans la masse ou dans la croûte de battance, ils vont augmenter le ruissellement (Poesen, 1989 ; Roose, 1994).

Si les sols sont tassés, ils seront moins perméables mais plus résistants à l'érosion. Le pâturage des jachères entraîne le tassement du sol qui, une fois labouré, va fournir des mottes cohérentes et plus résistantes au ruissellement.

La pente. Dans le domaine des pentes faibles (<2%), l'inclinaison des pentes augmente le volume ruisselé. Mais sur forte pente on observe un meilleur drainage interne et la formation plus lente des croûtes de battance lesquelles sont détruites au fur et à mesure de leur formation par l'énergie du ruissellement (Heusch, 1970 ; Roose, 1977, 1994). La longueur de pente intervient aussi car le refus à l'infiltration devrait théoriquement s'accumuler tout au long du versant. Cependant nous avons constaté dans de nombreux cas qu'il y a interaction entre l'effet de la longueur de pente, la rugosité de la surface et de la porosité du sol le long des versants.

(Wischmeier, 1966 ; Roose, 1994). Pour réduire l'érosion en ravine on interviendra sur la pente du canal en divisant celui-ci en secteurs à pente faible (pente de compensation = 6 à 25 % en fonction de la dureté de la roche locale), et en secteurs à pente raide renforcés par des seuils en pierres, gabions, grillages, touffes d'herbes ou d'arbustes.

Figure 5. 3 Diagramme de Hjulström (1935) Effet de la texture de la terre et de la vitesse de l'eau sur l'érosion, le transport solide et la sédimentation dans un canal.



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.

L'érodibilité des terres. F. HJULSTRÖM (1935) a étudié l'érodibilité des matériaux terreux de taille croissante en fonction de la vitesse des écoulements dans un canal. Il a démontré que l'érosion démarre pour une vitesse du fluide de 25 cm/seconde lorsque les berges sont très sensibles (100 microns = sables fins plus

lourds que les silts, matériaux les plus sensibles à l'érosion en nappe). Pour déplacer les sables plus lourds ou les argiles plus cohérentes, il faut des vitesses supérieures. Lorsque la vitesse du ruissellement diminue en dessous de 25 cm/s, on observe des dépôts de sables et de graviers. Les berges constituées d'argile et de cailloux sont bien moins fragiles que les berges sableuses. Lorsque la vitesse du ruissellement augmente, l'érosion linéaire décape tout le sol y compris des cailloux dont la taille dépend de la vitesse du flux, donc de la pente du terrain. Hjulström a aussi montré que le domaine de transport des sables et graviers est très étroit, ce qui signifie que dès que le ruissellement diminue, les sables et graviers se déposent et encombrant le lit des oueds et aussi les canaux des banquettes : d'où leur fragilité si elles ne sont pas entretenues régulièrement après chaque tempête importante.

5.5. La lutte contre le ravinement

Pour lutter contre le ravinement, il faut réduire ou détourner le ruissellement provenant de l'amont et réduire sa vitesse dans le ravin.

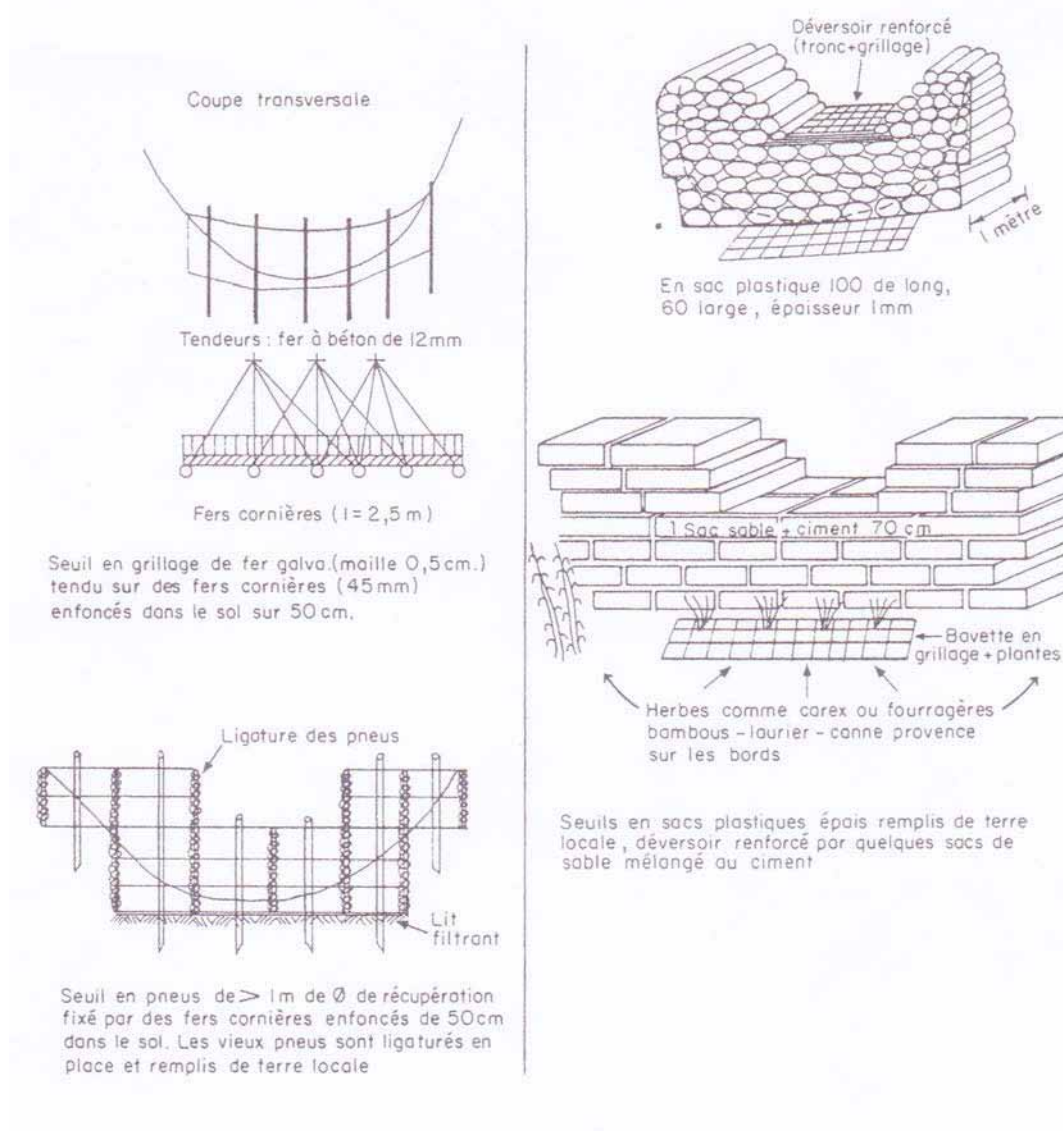
Aux champs, il est possible de réduire le volume du ruissellement et freiner l'érosion par l'adaptation des techniques culturales et l'extension du couvert végétal.

Sur des sols tassés, le labour profond permet un meilleur enracinement, un meilleur stockage de l'eau et donc un meilleur développement du couvert végétal et une réduction du ruissellement et de l'érosion (Charreau et Nicou, 1971). Si le sol est en bon état physique, une autre approche est possible qui consiste au contraire à réduire le travail du sol au minimum (travail à la dent sous la ligne de plantation), à laisser le sol toujours couvert (résidus de culture précédente, culture intercalaire, paillage, légumineuses de couverture, gestion sur place des adventices) et favoriser les activités de la faune perforatrice pour améliorer l'infiltration. Sur pentes faibles, le billonnage isohypse ou cloisonné peut aussi réduire le ruissellement. Enfin les cordons de pierres, les haies vives et les terrasses peuvent aussi réduire de 30 à 50 % le ruissellement et l'érosion (Roose, et al. , 2008).

La fixation biologique des petites ravines (Lilin et Koohafkan, 1987). Il suffit souvent de ne pas cultiver ces petites ravines, mais de maintenir ces terrains tassés sous prairie, et d'y dresser des haies vives, des cordons de pierres assez solides pour résister à la pression du ruissellement. Dans les zones péri-urbaines, on peut aussi creuser des ***étangs d'orage*** ou de petits barrages collinaires pour écrêter les crues et intercepter les sédiments boueux : cependant cette technique est coûteuse car les terrains urbains coûtent cher et il faut régulièrement curer ces petits réservoirs. Si le ravinement n'a pas décapé toute la terre jusqu'à la roche, et qu'une partie de la végétation tient encore dans la ravine, on peut tenter de ***restaurer la végétation naturelle et de l'enrichir avec des espèces vigoureuses*** et utiles comme les cannes de Provence, les bambous, la canne à sucre, les herbes fourragères,

le carex , les lauriers roses, certains cactus comme l'opuntia. Ailleurs on y introduit des **arbres fruitiers** (oliviers, caroubiers, amandiers, divers fruitiers) derrière des seuils ou des cuvettes protégées par des pierres.

Figure 5. 4. Divers types de seuils perméables, souples et peu coûteux



La stabilisation des ravines moyennes. Si le fond de la ravine est presque complètement décapé et la végétation arrachée, il est indispensable dans un premier temps, de fixer le fond par une série de seuils qui vont ralentir le ruissellement et capter une partie des sédiments. Au bout de quelques grosses pluies, ces seuils seront remplis de sédiments ; il faudra alors soit construire une seconde série de seuils en amont des premiers pour

relever le fond de ravine et mieux fixer les berges, soit végétaliser ces sédiments (planter des arbres sur les berges et des herbes souples au centre des ravines) pour laisser passer le flux d'eau tout en protégeant les dépôts. Il faut éviter de planter des arbres isolés au centre du ravin car le ruissellement tourbillonne autour de cet obstacle et le déterre. .

Comme l'état n'a pas les moyens humains et financiers d'entretenir des milliers de km de ravines petites et moyennes, il faut envisager avec les paysans riverains d'y planter un ensemble de plantes utiles (fruitiers, fourrages, bois de feu ou de construction) et de conclure des contrats leur permettant d'exploiter ces terres, à condition d'entretenir les seuils et de tenir le bétail à l'écart de l'aménagement (Roose, 1994).

La restauration des grosses ravines torrentielles.

Lorsque le fond des grosses ravines est couvert de roches et de grosses pierres, aucune plante ne peut résister aux débits de pointe et aux chocs des galets en migration. Il faut impérativement fixer le fond avec des seuils bétonnés ou des gabions remplis de grosses pierres. Ces aménagements très coûteux de génie civil (100 € le m³ de gabions), dépassent les possibilités techniques des paysans. Ils devront faire appel à des services techniques spécialisés de l'Etat.

La valorisation des ravines aménagées

L'intérêt de ces seuils, c'est de bloquer la progression du ravinement, mais aussi de stocker quelques dizaines de m³ de sédiments et de valoriser l'eau stockée dans les macropores des sédiments en produisant en saison sèche du fourrage vert et des arbres fruitiers qui peuvent inciter les paysans à s'investir dans la protection des ravines de montagne. En Algérie, ces ravines productives ont été appelées « oasis linéaires ». En Haïti, Brochet et al. (2017) ont choisi d'aménager les fonds de ravines suffisamment larges pour créer des zones sédimentaires fertiles, y stocker une partie du ruissellement venant des versants et y développer des cultures maraichères, des cultures bananières et des arbres fruitiers greffés. Des citernes accolées aux seuils en pierres bétonnées, stockent des eaux claires aptes à l'abreuvement du bétail.

L'aménagement des ravines coûte cher : aussi pour encourager les paysans à maîtriser le ravinement et entretenir les aménagements, il faut passer de la « restauration à la valorisation des ravines ».

DIX COMMANDEMENTS POUR L'AMENAGEMENT DES RAVINES

1. Tant qu'on n'a pas amélioré l'infiltration sur le bassin versant, il ne faut pas tenter de reboucher la ravine (sinon elle trouvera un autre lit), mais prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale (au minimum).
2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 1 à 6 ans, mais il doit concerner tout le bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils ; si on inverse l'ordre, les plantes sont emportées avec les terres lors des crues.
3. L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides.

Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluent de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.

4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine) qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps on peut doubler cet écartement et construire les seuils intermédiaires dès que la première génération de seuil est comblée de sédiments : stabiliser immédiatement les sédiments piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants.
5. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il vaut mieux drainer les seuils (grillage, chicanes ou pierres libres).
6. Les seuils doivent être ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements. Au contact entre le sol limono-argileux et les pierres des seuils, il faut prévoir une couche filtrante de sable et de gravier pour éviter que les sous-pressions n'entraînent les particules fines et la formation de renards.
7. Le courant d'eau doit être bien centré dans l'axe de la ravine par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates ± 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".

6. Bibliographie

Brochet M., Saintil Clossy, Lilin Ch., Roose E., 2017. Aménagements hydroagricoles : capture des eaux de ruissellement et restauration de la productivité des sols en Haïti. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » Eds. E. Roose, IRD Editions, Coll. Synthèses, Marseille, 711 p. : p. 565-580.

Cosandey C., Robinson M., 2000. Hydrologie continentale. Paris, Armand Colin/HER, 360 p.

Charreau C., 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 ; 903-976 et 1183-1247.

Heusch B., 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Annales Recherches Forestières du Maroc*, 12 : 176.

Hjulström F. , 1935. Studies on the morphological activities of rivers as illustrated by the river Fyries. *Bull.Geo.Inst Univ. Upsala* 25 : 293- 305 et 442-452.

Laouina A., Chaker M., Naciri R., Nafaa R., 1993. L'érosion anthropique en milieu méditerranéen : le cas du Maroc septentrional. *Bull. Réseau Erosion* 13 : 248-265.

Lilin Ch. et Koohafkan P., 1987. Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti. Rome, FAO, 36 p.

Poesen J., 1989. Conditions for gully formation in the Belgian loam belt and some ways to control them. *Soil Technology* 1 : 39-52.

Rey F., 2002. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud. Thèse Doct Univ de Grenoble *Bull Reseau Erosion* 21 : 429-434.

Roose, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et Documents ORSTOM 78, 108 p.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES. Bull. FAO Rome n°70: 422 p.

Roose E., Albergel J., De Noni G., Laouina A., Sabir M., 2008. Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. AUF, EAC, ENFI, IRD : 402 p.

Wischmeier W., 1996. Surface runoff in relation to physical and management factors. In « Panamerican soil conservation farm planning. Conservation congress, SAO PAOLO, Brazil ; 237- 244.

Chapitre 6. L'érosion en masse

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, et le ravinement aux lignes de drainage du bassin versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique et des formations géologiques tendres. Nous ne présenterons ici que les principes généraux de prévention et de lutte contre les mouvements de masse utilisables par les paysans. Seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux pour maîtriser les graves problèmes de glissements de terrains, souvent catastrophiques. Pour les informations techniques sur le génie civil à mettre en œuvre, consulter les ouvrages du CEMAGREF (1984-1985) et Heusch, (1988).

6.1. L'érosion aratoire lente

Cause et processus. Dès qu'un outil aratoire découpe un volume de sol et le déplace sur le champ, il y a érosion. Par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, ce type d'érosion décape les horizons superficiels du sol des hauts de pente et des zones convexes des versants, pousse ces masses de terre arable vers le bas du versant où elles s'accumulent, soit en talus sur la bordure des parcelles, soit en colluvions concaves de texture voisine des horizons d'origine. Il n'y a donc pas d'érosion sélective. L'importance de l'érosion aratoire dépend du type d'outil, de la profondeur du travail, de la forme et de l'inclinaison de la pente de la fréquence du travail du sol et de son orientation. Chaque labour à la charrue déplace environ 10-15 t/ha et chaque sarclage mécanique environ 1 à 2 t/ha.

En Equateur, De Noni et Viennot (1991), ont dû remonter une murette de 1,3 m en 24 mois (soit 40 t/ha/an). En Côte d'Ivoire, Rwanda et Burundi, Roose a observé la formation de talus de 1 m. en 4 à 5 ans, que ce soit en culture motorisée ou manuelle (Roose et Bertrand, 1971).

En Algérie, après 30 années de culture d'un verger sur une pente de 35% près de Médéa, les collets des arbres se trouvent 30 cm au-dessus de la surface du sol. Même si on additionne l'érosion sur un sol nu pendant 30 ans, on ne dépasse pas 3 cm, tandis que la reptation du sol par deux labours et deux pulvérisations /an atteindrait 27 cm soit 13,5 t/ha/an (Roose, Arabi, 1994).

Les indicateurs et les effets de l'érosion aratoire. Parmi les indicateurs on note :

- Les horizons humifères moins épais et plus clairs en haut des versants qu'en aval, comme pour l'érosion en nappe ;

- L'empâtement du contact versant/plaine ;
- Le comblement de certaines ravines sur le versant (Revel, 1989)
- Les filons de quartz fauchés à hauteur du fond de labour ;
- Les cailloux mélangés à l'horizon humifère en bas de pente.
- On a souvent confondu les effets de l'érosion en nappe et de l'érosion aratoire se traduisant tous deux par le décapage de l'horizon humifère et l'apparition de taches plus claires (= roches altérées) (Wassmer, 1981 ; Nyamulinda, 1989).
- Comme toute érosion en masse, l'érosion aratoire n'est pas sélective, ni à l'arrachage, ni au dépôt dans les colluvions. Par contre, elle est responsable du glissement discret de la couche arable du sommet des versants et des parcelles vers les talus des limites aval des champs (terrasses progressives) ou au contact des vallées (colluvions).

Les facteurs de l'érosion aratoire

L'intensité du déplacement de terre dépend :

- de l'intensité et de la fréquence du travail du sol. En zone semi-aride on observe souvent un labour rapide et superficiel aux disques suivi d'un hersage. En montagne tropicale humide on procède généralement à un labour, deux hersages et deux sarclo-binages ou sarclo-buttages. Plus la vitesse de circulation du tracteur est rapide et plus les transports de terre sont importants ;
- du type d'outil : la charrue à soc déplace plus de terre que le chisel (Revel, 1989) et que la charrue à disques ou que la herse. L'araire trainée lentement par des animaux éclate la surface du sol plus qu'elle ne la retourne : elle déplace moins de terre que la charrue ou la houe. Cependant sur forte pente, l'araire a tendance à glisser vers le bas des pentes en entraînant les mottes soulevées ;
- de l'orientation du travail. Le travail peut être effectué selon les courbes de niveau avec le versoir orienté vers le bas du versant ou vers l'amont (difficile à réaliser). Sur les pentes de plus de 15 %, le tracteur est obligé de labourer du haut vers le bas du champ, ce qui entraîne un déplacement latéral plutôt que vertical, mais laisse des sillons qui orientent les eaux de ruissellement vers le bas du champ. Par contre, dans les pays tropicaux, les travaux manuels s'effectuent à la houe du bas vers le haut du champ ce qui entraîne le glissement progressif de l'horizon superficiel et la formation rapide de terrasses ;
- de l'inclinaison de la pente. Plus la pente est forte et plus les mottes déplacées par la houe ou le tracteur roulent loin vers le bas de la pente. En montagne, les hauts de pente, les ruptures de pente et les sommets des collines sont souvent décapés. Le décapage s'accélère sur les versants convexes et ralentit sur les bas des pentes concaves, là où s'amassent les colluvions qui pourront être transformées en terrasses irriguées.

6.2. Les glissements rapides en planches ou en coups de cuillère

Les causes et processus

Les glissements de terrain en planche sont des décollements brutaux d'une couche de sol perméable plus ou moins épaisse, saturée d'eau, exerçant une pression hydrostatique sur un horizon plus compact, peu perméable, souvent la roche altérée ou un niveau riche en micas, servant de plan de glissement. Ce phénomène est courant dans la zone tropicale humide sur des schistes micacés ou des gneiss, des marnes ou argilites, ou des cendres volcaniques couvrant des granites. Ce phénomène se déclenche brutalement lors des tempêtes tropicales ou des secousses sismiques.

La cause des mouvements de masse rotationnels se trouve dans le déséquilibre entre d'une part la masse de la couverture pédologique, l'eau qui s'y trouve stockée et les végétaux qui la couvrent et d'autre part, la force de frottement de ces matériaux sur le socle de la roche altérée en pente sur lequel ils reposent. La pente limite où se développent ces glissements rapides varie de 40 à 60 %. Le déséquilibre peut se manifester progressivement sur plusieurs plans de glissement suite à leur humectation au-delà du point d'élasticité de la couverture pédologique (déformation avant rupture), soit par dépassement du point de liquidité sur des sols plus profonds que pour les mouvements en planches.

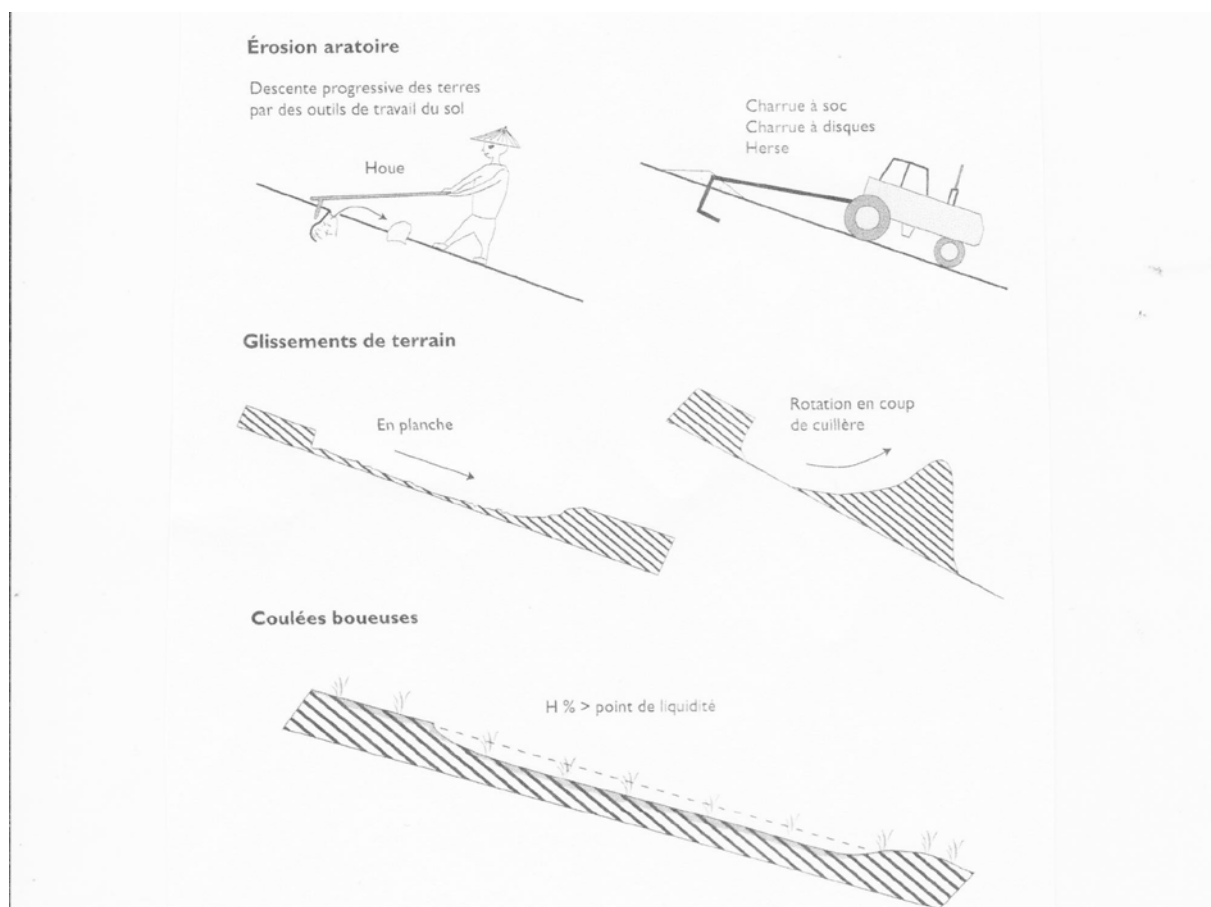


Figure 6.1. Diversité des formes d'érosion en masse (Roose, 1994)

La circulation rapide de l'eau dans les mégapores jusqu'à la roche pourrie provoquerait une pression hydrostatique capable de repousser les horizons structurés du sol, de décoller celui-ci du niveau fragilisé de la roche pourrie : la forte pente favoriserait alors le mouvement rotationnel.

L'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements en modifiant la forme du versant (terrassement, creusement du versant pour y installer une route ou des habitations, surcharge par des remblais instables, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par les méandres des rivières). La végétation intervient aussi. En Tanzanie, Temple et Rapp ont montré que 47 % des glissements de terrain sont situés sur des champs cultivés (maïs, mil, haricots), 47 % sur des jachères, et moins de 1 % sur des zones forestières, pourtant très humides. Même les arbres isolés semblent avoir un effet : une simple rangée d'arbres suffirait pour éviter les mouvements de masse. Seules les pistes non plantées d'arbres montrent des glissements de terrain.

Les indicateurs. Les glissements rotationnels laissent sur le versant des traces significatives :

- **Un décollement en amont de la couche perméable du sol, un déplacement sur un plan de glissement et un doublement de cette couche à l'aval ;**
- Un décollement en amont plus profond pour le mouvement rotationnel que pour les mouvements en planches ;
- Un basculement du volume en mouvement qui aboutit à une contre pente en aval, souvent une zone humide (marquée par des carex ou des roseaux) au contact avec le fond de la couverture pédologique d'où peut démarrer une ravine latérale ;
- Une langue de terre en pente forte ;
- Pas de sélectivité ni au départ, ni à l'aval.

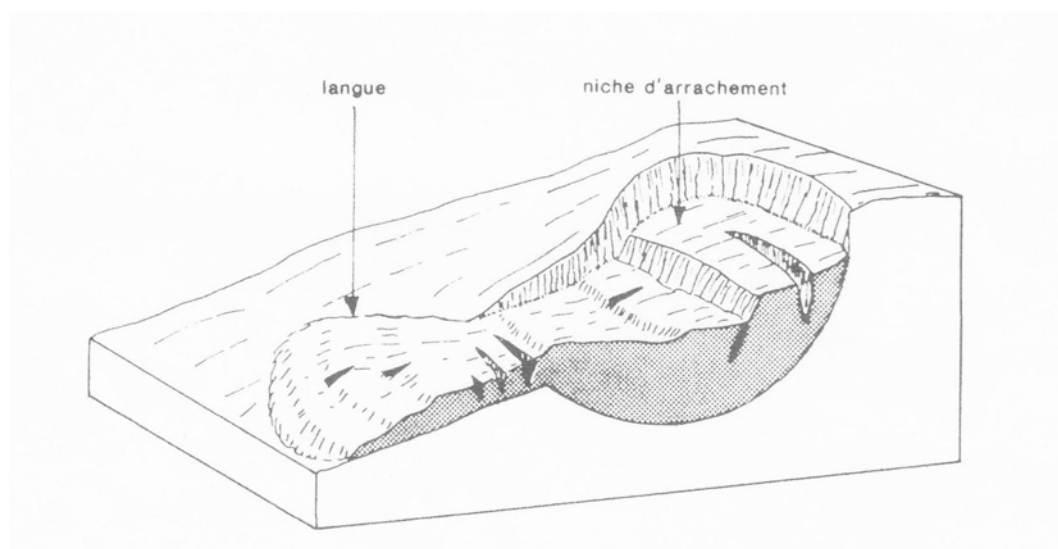


Figure 6.2. Glissement rotationnel (d'après Neboit, 1991)

6.3. Les coulées boueuses ou laves torrentielles

Cause et processus

Les coulées boueuses sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité. Elles peuvent emporter des masses considérables de boues, de cailloux et de roches de taille imposante (> 1 m³).

Les coulées se présentent comme un canal terminé par une langue de boue et de matériaux non triés. Les matériaux fins peuvent être repris ultérieurement par érosion en nappe ou rigoles laissant en place une masse de cailloux et de blocs rocheux de taille très hétérogène. D'après Temple et Rapp (1972) en Tanzanie, ces coulées boueuses apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle dont le ruissellement va nettoyer les altérites accumulées en bas de pente depuis quelques années.

Les indicateurs.

Les coulées boueuses laissent sur le terrain des traces facilement identifiables :

- un évidement amont jusqu'au niveau imperméable en continuité avec l'horizon de surface si celui-ci est protégé par un réseau dense de racines de graminées
- en aval une langue de terre boueuse bombée ;
- un tas de cailloux et blocs non tamisés en discordance avec les roches sous-jacentes

6.4. Les techniques de lutte contre l'érosion aratoire

La lutte porte sur le travail du sol et quelques aménagements

- **Réduction du nombre de passage des outils et l'importance du travail du sol.** Depuis une trentaine d'années en Amérique du Nord et du Sud, ainsi qu'en Australie sont développées des techniques de culture de conservation, réduisant le travail du sol au minimum (décompactage sans retourner la litière) : seule une dent ouvre la ligne de semis pour permettre d'injecter les engrais, les semences et les pesticides, tandis que la litière est foudroyée par un herbicide ou déchiquetée par un rouleau bardé de couteaux. Ces méthodes ont été testées avec des succès variables dans le SO de la France (Roose et Cavalié, 1986), au Maroc (Mrabet et al., 2004), en Tunisie (Raunet et al., 2004) en zone soudanienne (Diallo, Boli et Roose, 2008). Si la stabilité des agrégats et l'infiltration des horizons superficiels augmentent, il n'en va pas de même pour les rendements des cultures. Au Sud Mali et Nord Cameroun sur des sols sableux, le ruissellement et l'érosion baissent systématiquement tant que la litière couvre bien le sol ; par contre les rendements en coton sont corrects en années sèches (-10 à +20 %) tandis que le maïs en année humide, perd 20 à 40 %, si on ne compense pas les pertes d'engrais entraînés par les eaux de drainage.
- **Réduction de l'énergie dépensée pour le travail du sol.** Il n'est pas toujours nécessaire de retourner le sol avec une charrue. Un simple éclatement de l'horizon

humifère par les dents d'un chisel (ou un autre cultivateur) aère le sol, augmente la macroporosité, la capacité de stockage en eau, l'enracinement et maintient en surface la matière organique et les résidus de cultures. A la limite, le travail du sol est réduit à la ligne de semis tandis que 80 % de la surface du champ reste couvert par la litière. Un tel système réduit à néant le risque d'érosion aratoire et d'érosion en nappe.

- **L'orientation du travail du sol.** Si la pente est inférieure à 15 %, il est possible de travailler le sol au tracteur suivant les courbes de niveau, sans déplacer trop de terre, à condition de travailler en aller et retour (Revel, 1989). Au-delà de 15 % de pente, les tracteurs risquent de verser et sont obligés de labourer dans le sens de la pente ; par contre on peut semer perpendiculairement ou développer des systèmes de cultures pérennes avec plantes de couverture ou paillage.
- **Construction de terrasses progressives entre des talus.** Sur des sols suffisamment profonds, on peut aussi aménager des terrasses progressives beaucoup moins pentues que le versant.

6.5. La lutte contre les mouvements de masse rapide

Pour réduire les risques de mouvements de masse rapide il est préconisé :

- D'évacuer le drainage au niveau du plan de glissement ;
- De détourner le drainage superficiel (ruissellement) par un fossé ;
- D'augmenter l'évapotranspiration par l'implantation de jeunes arbres gérés en taillis, en particulier *l'eucalyptus* bien connu pour sa croissance rapide et sa forte consommation d'eau. Comme il ne supporte pas le gel, il faut sélectionner en haute montagne des espèces d'arbres connues pour *s'accrocher* dans les sols rocaillieux peu profonds et les fissures de la roche (*Fraxinus, Alnus, Pinus*, etc).
- La lutte contre l'érosion en masse doit avant tout être préventive : plan d'occupation des sols interdisant toute construction et modification du versant, zones réservées à une forêt de protection gérée sous forme de taillis pour ne pas surcharger la couverture pédologique. Cependant, il n'est pas toujours possible d'écarter toute culture des zones montagneuses tropicales souvent plus peuplées que les plaines environnantes car le climat y est plus sain (pas de paludisme, ni de mouche tsé-tsé) et les terres y sont plus riches et mieux arrosées (comme en Ethiopie et Afrique de l'Est). Dans ces conditions, il convient de transformer ces paysages en bocages formés de lignes d'arbustes légumineuses et de bananiers formant des terrasses progressives, d'arbres fruitiers et de champs étroits suivant les courbes de niveau entre des talus (<2m) stabilisés par des plantes fourragères. Pour protéger les ouvrages d'art, routes, barrages, hôpitaux, il faut des moyens importants pour drainer le sol au-dessus des horizons imperméables et stabiliser la couverture pédologique et les rochers (gabions perméables). Ces investissements ne se justifient que pour protéger des aménagements vitaux. Mais les paysans connaissent quelques

recettes comme planter des arbres (eucalyptus ou bambous) pour assécher l'assiette des talus de routes et stabiliser les berges. En jouant sur le choix des espèces, on transforme ces paysages en bocage stable (voir le bocage du pays Bamiléké dans les montagnes de l'Ouest camerounais).

6.6. Bibliographie

De Noni G., Viennot M., 1991. L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur. *Bull. Réseau Erosion*, 11 : 205-209.

Diallo D., Boli Z., Roose E., 2008. Influence of no-tillage on soil conservation carbon sequestration and yield of intensive rotation maize-cotton. *Research on sandy Alfisols of Cameroon and Mali*. In Goddard T., Zoebisch M. et al. Eds., *No-till farming systems. Special publication 3 By the WASWAC* : 383-392.

Heusch B., 1988. Aménagement d'un terroir : techniques de lutte contre l'érosion. CNEARC, Montpellier, 200 p.

Neboit R., 1991. L'homme et l'érosion dans le monde. Fac. de Lettres, Univ. Clermont-Ferrand, 2^{ème} édition, 270 p.

Nyamulinda V., 1989. Méthodes autochtones de conservation des sols en préfecture de Ruhengéri. *Bull. Agricole du Rwanda*, 3 : 147-158.

Mrabet et al., 2004. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influences des techniques culturales simplifiées. *Bull. Réseau Erosion* 23 : 405-415.

Raunet M., Richard JF., Rojat D., 2004. Premiers résultats de l'introduction du semis direct sous couvert et lutte antiérosive en Tunisie. *Bull. Réseau Erosion*, 23 : 388-404.

Revel J.C., Coste N., Cavalier J., Coste J.L., 1989. Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort toulousain. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25, 1 : 111-118.

Roose E., Bertrand R., 1971. Contribution à l'étude des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique occidentale. *Agron. Trop.* 26, 11 : 1270-1283.

Roose E., Cavalier J., 1988. New strategy of water management and soil conservation. Application in developed and developing countries. In ISCO 5 : Land conservation for future generations. Thailand, Bangkok, Min.of Agriculture : 913-924.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES. Rome *Bull. Pédol. FAO*, 70 : 420 p.

Roose E., Arabi M., 1994. Intensification de l'agriculture sans dégradation dans l'Atlas blidéen (Algérie). In « Introduction à la GCES » *Bull. pédologique de la FAO N° 70* : 363-370.

Temple P., Rapp, 1972. Landslides in Mgeta area, Western Uluguru Mountains, Tanzania. Geomorphological effects of Suddan heavy rainfall. *Geografiska Annales* 54, 3-4 : 157-194.

Wassmer P., 1981. Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion dans la préfecture de Kibuye. Thèse 3eme cycle, Univ. Strasbourg, 156 p.

Chapitre 7.

La dégradation de la productivité des sols tropicaux

7.1. Avec la pression démographique, la dégradation des terres atteint 20 %

Dans le monde, la population ne cesse d'augmenter : elle pourrait atteindre 11 milliards en 2100 et continue de croître dans les pays en développement situés pour la plupart dans les régions tropicales où la population double tous les vingt ans. Bien que la FAO estime que l'on dispose de techniques agricoles modernes capables de nourrir toute la population, il s'avère qu'aujourd'hui plus de 900 millions d'humains souffrent de sous-alimentation.

Les causes des pénuries de nourriture sont multiples : les guerres, les catastrophes naturelles, la sécheresse, le désengagement des gouvernements vis-à-vis du monde rural, la pauvreté et l'augmentation du prix des intrants (coût des transports), en particulier des engrais minéraux, mais aussi la pression foncière des multinationales qui dépouillent les petits paysans de leur droit à la terre (Ziegler, 2012). A ces causes s'ajoutent la pression démographique qui entraîne le surpâturage, l'extension des cultures à des sols fragiles ou pentus et la dégradation des terres cultivées où l'érosion sélective, la lixiviation des nutriments par les eaux de drainage, la minéralisation rapide de l'humus et les exportations par les récoltes ne sont jamais compensées par des apports suffisants de biomasse et de nutriments.

D'après le projet GLASOD (Oldeman et al, 1990), en Afrique 24,5% des terres étaient déjà dégradées en 1990 dont 48% en zones arides, 26% en zone semi-humides. En zones semi-arides, l'érosion éolienne (20%) est plus importante que l'érosion hydrique (15%), la dégradation chimique (3,3 %) et physique (1,7 %). Les causes principales sont le surpâturage (58 %), les cultures (8 %) et la déforestation (6,6 %). Pieri (1989) estime que les terres de savane au Sud du Sahara sont dégradées en raison des pratiques culturelles, de l'explosion

des activités microbiologiques des terres imposées par les alternances climatiques, de la structure instable des terres sensibles à l'érosion et de l'insuffisance des restitutions organiques et minérales. Pourtant ces terres, une fois restaurées, sont capables de produire durablement 5 à 10 fois la production moyenne mesurée actuellement en champs paysans.

Lors d'une enquête parmi des producteurs maliens de coton et maïs, nous leur avons fait préciser comment ils ressentaient la dégradation de leur terre ? Sans pouvoir les expliquer, ces petits paysans ont très bien observé les processus (Roose, 2017) :

La surface des sols devient plus claire : elle a perdu beaucoup d'humus ;

Les sols sont plus vite secs: comme le ruissellement est abondant, le stockage des eaux de pluie décroît ;

La surface du sol est plus vite encroûtée et battante : la stabilité des agrégats et la porosité du sol ont diminué ;

La couche arable du sol devient plus sableuse : l'érosion en nappe emporte sélectivement les particules légères, les plus fertiles (MO, argiles et limons) ;

Le sol retient moins bien les engrais, vu la perte des MO et de l'argile ;

Les cultures sont plus sensibles à la sécheresse et donc aux maladies ;

Finalement, le champ est envahi par les mauvaises herbes plus résistantes à la sécheresse et plus frugales.

La cause primaire semble la baisse des teneurs en matières organiques des horizons superficiels du sol, qui entraîne plus ou moins vite les autres effets de la dégradation : effondrement de la structure, et appauvrissement en nutriments du sol. Mais les processus sont complexes : érosion en nappe sélective, décapage de l'horizon humifère, minéralisation rapide des MO du sol par divers microbes, lixiviation des éléments solubles par les eaux de drainage, faible retour au sol de la biomasse produite, encore aggravée par la vaine pâture et les feux de brousse en saison sèche.

7.2. Définition et propriétés des sols tropicaux

Le sol est un épiderme fragile couvrant la surface de la terre. Contrairement aux êtres vivants, il n'y a pas de sol individuel. Comme il y a continuité entre un sol et son voisin, on devrait plutôt parler de couvertures pédologiques (Ruellan, 2010). C'est une mince couche (0,1 à >10 m) de matériaux meubles qui recouvrent le noyau rocheux de la terre. Le sol est le fruit de la désagrégation physique et de l'altération chimique des roches par les agents atmosphériques (gel-dégel, pluie-soleil), de l'hydrosphère (attaque par les acides carboniques apportés par les pluies acides, des acides humiques des eaux de drainage), par la biosphère (minéralisation par les microbes, perforation par les racines et par la faune qui y trouve un habitat très varié).

Le sol est un composé complexe d'éléments minéraux et organiques. Certains minéraux sont des résidus de la roche mère (ex. les sables quartzeux, les feuillets de micas, minéraux noirs ou des nodules calcaires) et d'autres sont le produit de la désagrégation (par hydratation, oxydation, complexation) ou d'une néogenèse en relation avec le milieu (les argiles de néoformation : kaolinite sur les versants bien drainés, argiles gonflantes sur les zones mal drainées, hydroxydes métalliques).

Les sols sont structurés, composés de pores remplis d'air ou d'eau, d'agrégats composés d'argile, de sables et de matières agrégeantes comme les hydroxydes métalliques, l'humus, les carbonates. La densité apparente d'une roche varie de 2,6 à plus de 13, tandis qu'un sol cultivé a une densité beaucoup plus faible de 0,8 dans certains sols volcaniques, de 1,3 après labour à plus de 2 sur sols riches en fer. Sous forêts le sol de surface est souvent plus léger que l'eau, tant il est poreux, soulevé par les racines, perforé par les animaux, allégés par les matières organiques. Bref, il y a un monde entre un sol et la roche ou les sédiments qui lui ont donné naissance.

C'est un milieu poreux qui filtre les eaux de drainage, stocke dans les micropores les eaux utiles pour les plantes, et permet aux eaux excédentaires de circuler rapidement dans les macropores pour alimenter les nappes phréatiques et plus tard les rivières. Les macropores permettent aussi aux racines de respirer.

C'est un habitat très diversifié qui abrite d'innombrables êtres vivants : des millions de microbes/cm³, des mycorrhizes, des azotobactères qui fixent l'azote de l'air, des animaux fouisseurs ou rongeurs qui transforment les déchets organiques en humus, des racines qui aspirent l'eau et les minéraux indispensables aux plantes, en profitant d'une infinité d'habitats différents et de surfaces de contact permettant les échanges entre les divers habitants. C'est l'un des refuges de la biodiversité d'où on tire de nombreuses molécules utilisées par l'homme (antibiotiques, ferments lactiques, etc).

C'est un lieu de stockage de l'eau, de métaux rares, des eaux minérales, des argiles pour la poterie, de minéraux et de métaux recherchés par l'industrie, de séquestration du carbone.

C'est un matériau de construction isolant utilisé depuis l'antiquité pour élever des murs en argile tassée avec des fibres ou fabriquer des briques séchées au soleil. Une fois cuites à haute température ces argiles forment des briques et des tuiles abritant durablement les masures comme les palais.

C'est un lieu de stockage du carbone de l'air et d'échange des nutriments pour les plantes (et les animaux) azote, phosphore et soufre dans les matières organiques, cations et métaux adsorbés aux argiles et à l'humus, divers nutriments constituant des argiles et limons et certains sables capables de restituer progressivement de la silice, des cations (K+Ca+Mg) et divers oligoéléments dont les plantes et les animaux ont besoin pour leur croissance. C'est enfin un piège où séquestrer le CO² de l'air (Roose et Barthès, 2006). **Ce milieu complexe, composé de solides, de liquides et de gaz, est le support de la vie.**

7.3. La dégradation des sols

Cependant, avec la pression démographique et l'exploitation intensive des sols, l'homme néglige les règles naturelles d'entretien, de repos et de protection contre divers agents de déstructuration. Les stocks de nutriments sont abondants dans les sols, plus importants que les exportations par les récoltes. Mais au bout de 4 à 10 ans, les plantes ayant exporté les « nutriments assimilables », on peut constater que la capacité du sol à produire des végétaux se dégrade. Cette dégradation se manifeste par la perte de plusieurs qualités du sol suite à l'intervention de divers processus accélérés par les activités de l'homme.

La minéralisation des matières organiques

Elle est indispensable pour transformer en humus les litières, cadavres et déchets organiques et plus tard, pour restituer progressivement les nutriments (N, P, oligoéléments, bases) aux plantes. Mais lorsqu'on défriche le milieu naturel et qu'on supprime l'apport régulier de litières et de résidus organiques, la population microbienne du sol s'attaque à l'humus (ensemble complexe d'acides humiques libérés par les microbes du sol) et aux matières organiques du sol responsables de la stabilité structurale. Si en plus on aère le sol par les travaux culturaux (labour, billonnage, sarclage, etc.) on accélère l'oxydation des matières organiques et la dégradation des couches superficielles du sol jusqu'à descendre en dessous de certains seuils : 0,5 % de MO pour les sols sableux et 1,2 % pour les sols argileux (Feller et Beare, 1997). En dessous de ces seuils, la structure du sol s'effondre, des croûtes se forment sous la battance des pluies, l'infiltration diminue fortement, le ruissellement et

l'érosion augmentent, ce qui entraîne l'assèchement du sol et l'appauvrissement sélectif en nutriments (Roose, 1994).

La dégradation par l'érosion en nappe

Les gouttes de pluie pilonnent la surface du sol, détachent des particules et micro-agrégats des mottes, arasent la rugosité de la surface du sol créée par le labour. Il se forme alors des pellicules de battance et dans les creux des croûtes de sédimentation. Celles-ci réduisent sévèrement la capacité d'infiltration des eaux de pluie (de 100 à <5 mm/heure). L'érosion en nappe peut déplacer entre 0,1 et 2 t/ha/an de carbone, autant que le pouvoir du sol de séquestrer les gaz carboniques dans les horizons superficiels (Roose et Barthès, 2006). Comme le ruissellement en nappe se déplace lentement à la surface du sol, il ne peut emporter sur de longues distances que les particules légères (argiles, limons, nutriments et MO). Le ruissellement laisse en place des nappes de sables et des graviers stériles et forme de minces croûtes d'érosion et de sédimentation qui réduisent drastiquement l'infiltration et la respiration. L'érosion en nappe exporte sélectivement les particules légères, les plus fertiles et prive l'horizon labouré de l'humus et des nutriments (Roose, 1994).

La dégradation par compaction du sol

Les animaux, les paysans et les engins utilisés pour mécaniser les travaux cultureux exercent une pression de 1,5 à 6 kg/cm² à la surface du sol : cette pression se transmet progressivement en profondeur (50 cm), écrase les macropores, ralentit la circulation de l'eau et de l'air indispensable aux racines (pourriture par manque d'oxygène), empêche la pénétration des racines et rétrécit l'espace où les plantes puisent l'eau et les nutriments dont elles ont besoin pour leur développement. On observe alors une réduction progressive de la productivité du sol car les racines des plantes n'ont plus accès aux couches profondes du sol.

La pollution des sols par les métaux lourds, ou par les sels calcaires ou sodiques déposés par l'évaporation des eaux de nappe

L'épandage répété des boues de ville, des eaux usées, des hydrocarbures, de certains produits industriels ou des lisiers des animaux, apportent des métaux lourds rapidement adsorbés par les argiles. Dans les champs, un excès d'azote provenant des lisiers ou des engrais chimiques, peut se libérer dans les eaux de drainage qui vont polluer la nappe phréatique. Le milieu poreux que constitue le sol accumule lentement ces produits qui deviennent toxiques pour les plantes et la santé des hommes.

Par ailleurs dans les zones arides, l'évaporation des eaux de nappe riches en sels de sodium ou de calcaire finit par accumuler en surface des croûtes peu perméables ou des

horizons à pH trop élevé pour que les racines puissent les supporter. Ces pollutions sortent du cadre de cette étude en zones de montagnes tropicales.

7.4. L'effet de la dégradation des sols sur la productivité en maïs

7.4.1. Influence de l'érosion en nappe sur la production en maïs d'un sol ferrallitique acide argileux du Burundi

Au Burundi central, à la station de l'IRAZ près de Gitega, sur un sol argileux acide ferrallitique, l'érosion a été mesurée pendant trois années sur 6 parcelles d'érosion (300 m² et 8 % de pente) soumises à quatre niveaux de paillage (Rishirumuhirwa et Roose, 2017). Les pertes en terre s'élèvent à 154 t/ha/3ans sur la parcelle nue de référence, 54, 17 et 0,12 t/ha/3ans sur des bananeraies avec une surface couverte respectivement de 20, 40 et 100 % par le paillage. Sur ces parcelles ayant connu un large éventail d'intensité d'érosion en nappe, on a mesuré l'arrière effet de la dégradation du sol par ce processus. La 4^{ème} année, après l'arrachage des bananiers, chaque parcelle fut semée uniformément en maïs dont un quart de chaque parcelle n'a reçu aucun amendement. Le rendement en maïs grain a diminué significativement (1,7-1,0-0,5-0 t/ha) sur ces parcelles où l'érosion variait de 0,01 à 10 mm. L'horizon superficiel a donc une mémoire très fine de l'érosion en nappe sélective subie les années précédentes.

Cette « mémoire du sol » a aussi un effet très net sur la possibilité de restaurer la productivité de ces parcelles. Chaque parcelle a été divisée en quatre sous-parcelles recevant des apports croissants :

T0 = témoin sans apport ; T1 = apport de 6 t/ha de fumier de ferme (matière sèche) ; T2 = T1 + NPK (60, 60, 40) ; T3 = T2 + dolomie (500 kg/ha).

Tableau 7.1. Réponse du maïs (rendement en kg/ha) à trois méthodes de restauration (T) des champs érodés (en t/ha/3ans)

Paillage	Erosion	T0	T1+f	T2+f+e	T3+f+e+d
Nue= 0%	154	0	326	732	610
20 %	54	597	2387	2903	2550
40 %	17	1058	2726	3215	2767
100 %	0,1	1506	2806	4191	3201

La parcelle nue, très érodée devient rapidement improductive en maïs : même avec un apport de fumier et d'engrais minéral complémentaire le rendement reste médiocre (< 8 quintaux). Les parcelles les mieux protégées (100 % paillés) répondent très bien aux tentatives de restauration : la production en grain passe de 15 quintaux sans apport, à 28 quintaux avec fumier et 42 quintaux avec fumier plus compléments minéraux. Les parcelles intermédiaires réagissent d'autant mieux aux apports que le paillage a été efficace pour protéger de l'érosion. On note l'influence très positive du fumier, mais par contre le complément de dolomie sur ce sol acide semble avoir un effet dépressif : peut-être dans ce sol très acide, l'apport de dolomie provoque peut-être, une insolubilisation du phosphore.

Rishirumhirwa et Roose (2017) ont estimé le coût économique de la restauration des terres érodées en comparant le coût des intrants et les plus-values qu'ils génèrent en termes de revenus. Sur la parcelle témoin nue et très érodée, aucune méthode de restauration n'est économiquement rentable. Par contre le maïs rentabilise bien le fumier (12€/t). Sur les autres parcelles, la combinaison du fumier et des engrais minéraux (0,8 € le kg) permet d'accroître les rendements en maïs grain (30 à 42 quintaux), mais le taux de rentabilisation est moindre car le coût des engrais importés est très élevé faute de contact du pays avec la mer. Il faut donc compléter la fumure locale (organique ou minérale) avec un apport d'engrais industriel nécessaire pour corriger les carences. Il faudrait aussi explorer les ressources locales, minérales (roches volcaniques, phosphates, calcaire, dolomie, broyées) ou organiques (déchets agricoles ou industriels, boues et déchets urbains, etc.).

7.4.2. L'érosion en nappe sélective est dix fois plus dommageable que le décapage de la surface d'un sol ferrugineux sableux pour la production de maïs

A la station de Mbissiri près de Tchollire sur un sol ferrugineux sableux des plaines du Nord Cameroun, (Boli, Roose, Zahonero, 1998), l'érosion mesurée pendant 4 ans sur des parcelles d'érosion (100 m² et 2 % de pente) a atteint 160 t/ha/4 ans sur la parcelle nue standard (= 10 mm), 90 t/ha/4ans (soit 6 mm) sur les parcelles labourées soumises à une rotation intensive maïs – coton et 30 t/ha/4ans (= 2 mm) sur des parcelles soumises aux mêmes cultures mais avec un travail du sol minimum sur la ligne de plantation et une litière couvrant > 30% de la surface du sol. La 5eme année toutes les parcelles ont été semées en maïs uniformément, sans fertilisation. En moyenne les parcelles

antérieurement labourées ont produit 10 quintaux de moins que les parcelles peu travaillées (25 quintaux /ha/an), soit 40 % de moins pour une différence d'érosion sélective de 4 mm.

A proximité des parcelles d'érosion, on a décapé mécaniquement 30 parcelles de 0, 50, 70, 100 et 150 mm de l'horizon humifère pour simuler une érosion décapante non sélective des particules légères. Après une plantation uniforme de maïs, le rendement en grain a décru de 50 % sur les parcelles décapées de tout l'horizon humifère (15 cm) et de 40 % pour un décapage de 40 mm. L'érosion en nappe sélective est donc dix fois plus délétère que le décapage non sélectif (Boli, Roose, 2017).

Sur les mêmes parcelles d'érosion, on a observé la 4^{ème} année l'activité des vers de terre après une rotation intensive maïs-coton en fonction des techniques culturales (et de l'érosion). Sur les parcelles peu ou pas travaillées couvertes par les résidus de culture, on a observé 320 à 480 turricules /100m², tandis que sur les parcelles labourées (résidus enfouis) on en a trouvé à peine 5 à 70 /100m². Le labour qui chamboule l'habitat des vers de terre semble donc plus dangereux pour les activités des populations de vers de terre que l'usage d'engrais minéraux, des pesticides et herbicides abondamment utilisés sur les cultures du cotonnier et du maïs. Le maintien d'une litière de résidus de culture ou un paillage de graminées protègent la faune qui assure la perforation des horizons de surface et maintiennent une bonne infiltration des eaux de pluie (Boli et al., 1998).

Sur deux blocs représentant une jeune défriche (5 ans) et une vieille défriche (35 ans) sur un sol sableux dégradé par les cultures intensives coton/maïs, les risques de ruissellement et d'érosion augmentent avec le temps. Les parcelles labourées perdent 10 à 25 % de plus de ruissellement que celles en « travail réduit », et 5 à 20 t/ha/an de terre dont 4 à 10 t/ha de suspensions riches en argiles, MO et nutriments. Les parcelles en billonnage cloisonné ne perdent pas beaucoup de ruissellement, ni d'érosion, mais produisent 20 % de moins que celles simplement labourées. Le billonnage cloisonné entraîne donc une dégradation de la structure et un appauvrissement en argile et MO.

Dans les sols sableux, le taux de MO de l'horizon humifère (10 cm) est un bon indicateur de la fertilité. Sous savane arborée, le taux de carbone reste stable (C= 0,7 %). Après labour et culture, le carbone tombe à 0,3 % en deux ans et en 5 ans si semis-direct sous litière. Au bout de 35 ans de culture, en

semis-direct, le taux de carbone ne dépasse pas 0,2 %. Il semble donc qu'il y ait deux seuils de carbone : l'un C_{max} sous savane arborée (0,7%) et l'autre $C_{minimum}$ sous sol nu labouré (0,2 %). Il est difficile de remonter rapidement au taux optimum dans ces milieux sableux tropicaux humides où la minéralisation par les microbes et les insectes est très rapide et la biomasse limitée.

7.5. L'influence du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale (Roose, 2017)

Vu l'importance de la biomasse des forêts et des savanes tropicales, on pourrait croire que les sols d'Afrique occidentale sont très fertiles. En général, il n'en est rien. Les arbres croissent lentement en recyclant les nutriments libérés par la minéralisation de la litière et des racines. Les feux de brousse accélèrent encore le turnover. Dès qu'il défriche le milieu naturel, le paysan brûle cette encombrante biomasse et disperse les cendres par un léger travail du sol. En 3 à 5 ans, en fonction de la texture et de l'agressivité des pluies, le rendement des cultures diminue, tandis que le sol perd 50 % de son humus : on constate alors une profonde dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques des horizons labourés (Siband, 1974 ; Roose, 1981 ; Pieri, 1989 ; Feller, 1995).

Beaucoup de chercheurs pensent que cette dégradation rapide des sols tropicaux provient des taux d'érosion impressionnants (1 à 700 t/ha/an pour des pentes de 1 à 25 %) dès que les sols sont défrichés et labourés. Il suffirait dans ce cas de maîtriser l'érosion par des techniques classiques de conservation des sols pour restaurer la productivité des terres, mais il n'en est rien : « un sol dégradé conservé » ne produira guère plus, malgré le travail de terrassement. Il faut en plus développer un système de production pour maîtriser la minéralisation des MO et la lixiviation des nutriments par les eaux de ruissellement et de drainage. C'est pourquoi nous avons rassemblé les pertes de nutriments par érosion et drainage observées dans quatre stations expérimentales : 1/sous forêt dense humide subéquatoriale sur sables tertiaires acides (Abidjan) 2/ sur schistes (Azaguié), 3/ sous une savane arborée soudanienne sur sols ferrallitiques sableux sur granite (Korhogo) et 4/ sous une savane herbacée soudano-sahélienne sur sol ferrugineux sur

granite (Saria). La pluviosité annuelle moyenne diminue de 2100 mm (Abidjan), à 1800 mm (Azaguié), 1300 mm à Korhogo et 730 mm à Saria. L'érosion dans le milieu naturel et dans le milieu cultivé a été mesurée durant 4 à 12 ans en parcelles d'érosion standards (5 x 20 m) et le drainage mesuré en lysimètres non remaniés (voir en détail dans Roose, 2017 : 41-51).

L'érosion. Dans le milieu naturel, les pertes en terre sont faibles : 50 à 150 kg/ha/an sous forêts et sous savane protégée des feux et du bétail. Par contre sous cultures, l'érosion varie beaucoup en fonction du couvert végétal : de 5 à 90 t/ha/an sous céréales en fonction de la pente, des techniques culturales et des pluies, 2 t/ha/an sous bananeraie intensive... et 700 t/ha/an sur sol nu travaillé.

Le drainage. La lame d'eau qui percole à travers les horizons exploités par les racines jusqu'à la nappe décroît de 880 à 640 mm dans la zone subéquatoriale (Pluie >2000 mm), à 250 mm dans la zone soudanienne (P=1350 mm), et 20 à 140 mm dans la zone soudano-sahélienne (P=730 mm). Sous cultures, le drainage dépend de la pluie, mais aussi du ruissellement (3 % des pluies en milieu naturel, 25 à 40 % sous céréales) et de l'évapotranspiration prélevée par les racines sur 1 m de profondeur sous cultures et sur 10 m sous forêts (Roose, Lelong, Colombani, 1983).

Les pertes en carbone. Dans le milieu naturel, les pertes en MO par drainage et érosion sont faibles (15 + 71 kg/ha/an sous forêt, à 8 + 2 kg/ha sous savane) par rapport au stock de carbone de l'horizon humifère (14 t C/ha) et aux dépôts par la litière (3 à 10 t/ha/an sous forêt tropicale). Le taux de MO du sol a donc tendance à augmenter en milieu naturel protégé des feux et du bétail. Sous cultures, les pertes en C par drainage (117 à 1 kg) et surtout par érosion ne sont plus négligeables (1866 à 82 kg/ha/an) : elles sont du même ordre de grandeur que le potentiel de séquestration du carbone par le sol. L'importance des migrations de MO dépend de l'érosion, des exportations par les récoltes, du taux de minéralisation des MO et donc des techniques culturales, de la pente et du couvert végétal durant la saison des pluies (Roose et Barthès, 2006). Le paillage et l'association de plantes de couverture réduisent beaucoup l'érosion, mais augmente le drainage :

l'enfouissement des végétaux verts accélère parfois la minéralisation des MO du sol.

Les pertes en azote. Dans le milieu naturel, les pertes en N sont faibles : 3 à 1 kg par érosion et 31 à 2,5 kg/ha/an par drainage. Les besoins des plantes en N sont tels que, une fois minéralisés en nitrates, ils sont rapidement assimilés par le réseau racinaire très dense. Sous cultures sarclées et fertilisées, les pertes en N sont importantes par érosion (183 à 15 kg/ha) et par drainage en milieu humide (50 à 157 kg/ha/an). En milieu tropical sec, le drainage est très réduit ainsi que les pertes en N soluble (1,6 à 4,2 kg/ha/an), par contre les pertes en N gazeux augmentent. L'azote soluble n'étant pas retenu par les argiles, ses pertes vont dépendre de la fraction des engrais distribués avant que les racines puissent s'en emparer : d'où la technique du fractionnement des apports en engrais solubles. A Azaguié, le rendement de la bananeraie dépend étroitement de la fertilisation. Pour récolter 35 t/ha/8 mois de culture, le planteur distribuait 700 kg d'urée (moins acidifiante que les sulfates) en dix fractions distribuées au pied de chaque bananier. Malgré ce fractionnement, les pertes en N par drainage ont atteint 60 % des engrais (Roose et Godefroy, 1977).

Les pertes en phosphore. Dans le milieu tropical naturel, les pertes en P par érosion et drainage sont très réduites (0,1 à 2 kg/ha/an) car les phosphates solubles sont rapidement fixés par les hydroxydes de fer et d'alumine, abondants dans ces sols tropicaux. Sous cultures, les pertes en P par drainage sont aussi faibles, mais les pertes par érosion peuvent atteindre 2 à 33 kg/ha/an. Aussi les engrais phosphatés sont-ils apportés en fumure de fond avant la plantation. La majorité des sols tropicaux sont carencés en phosphore assimilable indispensable pour le développement des graines : par conséquent, les végétaux, les composts et les fumiers sont pauvres en P (0,1 % de P dans les fumiers). Il est donc indispensable de compléter la fumure organique par un apport de phosphore minéral assimilable.

Les pertes en potassium. En milieu naturel, les pertes en K par érosion sont négligeables. Par contre les pertes en K dans les eaux de drainage sont élevées en milieu forestier humide (7 à 69 kg/ha/an) et un peu moins en zone tropicale sèche (4 à 21 kg/ha/an). Sous cultures sarclées et fertilisées les pertes en K atteignent 50 kg/ha/an. Dans les

eaux de drainage, les pertes sont modérées sous céréales peu fertilisées (0,6 à 3 kg/ha/an), mais très importantes sous bananeraie intensément fertilisées (274 kg/ha/an) malgré le fractionnement en dix doses. Le risque de lixiviation du K par les eaux de drainage est donc très élevé en milieu tropical humide.

Les pertes en calcium et magnésium. En milieu tropical naturel, les pertes de Ca + Mg par érosion sont faibles (0,2 à 1,4 kg/ha/an). Par contre les eaux de drainage exportent 47 à 11 kg de Ca et 30 à 3 kg/ha/an de Mg. Sous cultures les pertes par érosion ne sont plus négligeables (70 à 15 kg de Ca et 35 à 9 kg de Mg). Les pertes par drainage sont très variables en fonction des apports de chaux ou de dolomie (217 à Azaguié, 125 à 3 kg/ha/an de Ca, 95 kg à Azaguié et 26 à 1 kg de Mg).

Les risques de lixiviation du Ca et du Mg sont donc importants en milieu tropical humide dès lors qu'on apporte beaucoup d'azote (très acidifiant) et de la chaux ou dolomie (1 t/ha de dolomie à Azaguié à chaque replantation). A chaque apport d'engrais azoté, on a observé un lessivage de Ca+Mg dans les eaux de drainage des lysimètres. Bien que les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux soient très désaturés, les risques de lixiviation de Ca+Mg+K sont importants et il faut en tenir compte quand on cherche à améliorer le pH du sol et réduire la toxicité aluminique qui y est associée.

Pendant 17 années, on a comparé les propriétés des échantillons composites du sol (15 échantillons sur 10 cm) des parcelles d'érosion d'Adiopodoumé. Roose (1977) a constaté que lorsque l'érosion en nappe est croissante :

- les teneurs en argile+limons de l'horizon labouré du sol augmentent (de 14 à 18%) par suite du décapage de l'horizon superficiel sableux ;

- les teneurs en carbone et azote décroissent jusqu'à un seuil minimal stable : (C=1,8% et N=0,14% sous forêt et C=0,7% et N=0,06% sous sol nu) ;

Le pH est acide sous forêt et sol nu (4,2 et 4) mais s'améliore sous culture fertilisée (pH=5 à 5,6) parallèlement à la somme des cations échangeables et au phosphore.

Il semble donc que, moyennant une fertilisation organique et minérale appropriée, on puisse maintenir ou même améliorer le niveau de fertilité chimique des sols forestiers défrichés avec soin. Par contre les propriétés physiques se dégradent nettement lors de la culture après défrichement qu'il s'agisse de la porosité, de la densité apparente, de l'infiltration ou de l'eau utile, en même temps que les MO.

7.6. Conclusions

Sur la séquence tropicale étudiée, on peut distinguer trois pôles :

- Les forêts humides subéquatoriales couvrent des sols ferrallitiques à argile kaolinitique, très désaturés, abondamment arrosés par les pluies et généralement bien drainés. Bien couverts par la litière forestière, les pertes par érosion sont faibles, mais les pertes par drainage ne sont pas négligeables : ces sols sont donc acides. Dès qu'on défriche la forêt et dénude le sol lors des labours, les risques d'érosion augmentent considérablement (25 à 250 t/ha/an en fonction du couvert et de la pente) ainsi que les pertes de nutriments par érosion et lessivage, surtout si le niveau de fertilisation est élevé.
- Les forêts sèches et les savanes arborées soudaniennes, quoique sèches pendant la saison chaude, sont bien arrosées pendant 3 à 5 mois durant lesquels les risques d'érosion et de lixiviation sont encore importants : il faudra en tenir compte pour fractionner la fertilisation en fonction des besoins des cultures et des risques de drainage.
- Les savanes herbeuses soudano-sahéliennes et sahéliennes couvrent des sols ferrugineux tropicaux à kaolinite et illite moins désaturés et moins sujet à la lixiviation par le drainage et à l'érosion (pente et couvert végétal faibles). Mais une fois défrichées, ces zones de glacis à pente faible, souffrent du colmatage de la surface du sol par la battance des pluies et d'une érosion particulièrement sélective en carbone, argile et nutriments.

En fonction du type de dégradation des terres, il faut mettre en place des stratégies adaptées aux processus majeurs concernés et aux risques climatiques.

*L'érosion en nappe ne déplace que quelques mm de sol par an, mais le ruissellement entraîne les particules légères, les plus fertiles : les MO, argiles et limons responsables à la fois du stockage des nutriments, de la structure de la surface du sol et de la capacité d'infiltration des eaux de pluies. Cette érosion sélective entraîne donc une dégradation rapide (en 4 à 10 ans en fonction du taux d'argile) de la productivité du sol. Le maintien d'une couverture permanente et l'apport régulier d'une litière sont une des clés pour dissiper l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement, nourrir la faune qui perfore le sol et maintenir l'infiltration et l'alimentation hydrique et minérale des cultures. Notons que la battance des pluies détache bien plus de terre qu'elle n'en exporte du champ : elle participe ainsi à la dégradation de sa structure et de ses propriétés physiques. La pratique du paillage et du semis direct sous la litière des résidus de culture réduit par ailleurs le tassement du sol et les dépenses d'énergie (moins de tracteur).

* L'érosion en ravine déplace 10 à 1000 fois plus de terre, concentre le ruissellement dans des canaux où il développe une énergie telle qu'il arrache des mottes et même des blocs de roches. La restauration de ces terrains exige à la fois l'amélioration de l'infiltration sur l'ensemble du versant et la dissipation de l'énergie du ruissellement par des seuils mécaniques et le développement d'une flore adaptée à ces milieux trop humides en saison des pluies et arides en saison sèche. Il faut donc choisir des arbres pour stabiliser les berges et des herbes au fond du canal pour laisser couler les excédents d'eau sans érosion.

* L'érosion en masse concerne soit le glissement lent de l'horizon superficiel des sommets vers la vallée, soit la liquéfaction de zones saturées et le déplacement rapide de boues, soit le glissement rapide de tout un versant. En milieu rural, seuls les arbres à enracinement puissants (eucalyptus, bambous, frênes, aulnes, chênes, peupliers, etc.) peuvent opposer une résistance aux glissements, assécher le plan de glissement et renforcer la rugosité du contact du sol avec la roche.

* Les pertes de nutriments dans les eaux de drainage sont assez comparables sous végétations naturelles et sous cultures paillées sauf si on apporte beaucoup d'engrais solubles (ex. sous bananeraies). Le risque de lixiviation des nutriments solubles est aigu en milieu tropical humide à fort drainage concentré sur quelques semaines, y compris en zone soudanienne durant la saison des pluies. Le mode de fertilisation doit tenir compte de ce

risque en plantant tôt, en fractionnant les apports d'engrais solubles et en adaptant les doses à la capacité des plantes et des argiles à capter ces nutriments.

* Dans tous ces écosystèmes des régions tropicales, l'agroforesterie combinée à la culture sous paillis, sont des systèmes qui présenteraient la meilleure solution. Non seulement il allie la couverture du sol à l'abondance des résidus végétaux, mais aussi au transfert des nutriments des horizons profonds vers la surface (Young, 1990).

7.7. Bibliographie

Boli Z., Roose E., Zahonero P., 1998. Effets et arrière-effets des pratiques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production d'une rotation intensive coton/maïs sur un sol sableux des savanes humides du Nord-Cameroun. *Bull. Réseau Erosion*, 18 : 246-259.

Feller C., et Beare, 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 : 69-116.

Oldeman L., Hakkeling R., Sombroek V., 1990. World map of the status of human induced soil degradation. Projet Glasod, ISRIC, Wageningen, Unep Nairobi.

Pieri C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et développement agricole au Sud du Sahara. Cirad, Montpellier Agridoc-International, 444 p.

Rishirumuhirwa Th., Roose E., 2017. « Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi » In E. Roose eds, IRD Editions, Marseille : 211-222.

Roose E., Godefroy J., 1977. Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sous forêt et sous bananeraie fertilisée sur schiste de basse Côte d'Ivoire (Azaguié, 1967-75). *Cah. ORSTOM Pédol.*, 15 : 409-436.

Roose E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Paris, ORSTOM, Collection Travaux et Doc. 78, 108 p.

Roose E., 1981. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Paris, ORSTOM, coll. Travaux et Documents 130, 566 p.

Roose E., Lelong F., Colombani J., 1983. Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique. *J. Hydrologique* 28, 2 : 283-309.

Roose E., Barthès B., 2006. Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions. In Roose E., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B., eds. *Soil erosion and carbon dynamics. Advances in Soil Science*, CRC, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA : 55-72.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie. IRD Editions, 712 p.

Roose E., Boli Z., Rishirumuhirwa Th., 2017. Les sols tropicaux et leur dégradation en fonction des types d'érosion. In Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. E. Roose, eds, IRD Editions, Marseille : 29-40.

Ruellan A., 2010. Des sols et des hommes : un lien menacé. IRD Editions, Marseille, 105 p.

Siband P., 1974. Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance (Sénégal). *L'Agronomie Tropicale*, 29, 12 : 1228-1248.

Young A., 1990. Agroforestry for soil conservation. Wallingford, UK., CAB International. Icrif, 276 p.

Ziegler, 2011. Destruction massive. Géopolitique de la faim. Edition du Seuil, Paris.

Chapitre 8.

La lixiviation des nutriments par les eaux de drainage

Au cours de l'étude sur le ruissellement et les pertes de nutriments, il est apparu que le drainage était bien plus volumineux que le ruissellement, tout au moins pour les zones équatoriales et les zones soudaniennes où les pluies sont concentrées sur quelques mois de l'année. Les parcelles d'érosion de 100 à 200 m² sont bien adaptées à l'évaluation de l'effet des divers facteurs que l'on peut maîtriser, mais le ruissellement varie de 2 à 30 % des pluies annuelles tandis que le drainage peut atteindre 50 % des pluies annuelles et plus en cas de tempêtes tropicales. Nous avons donc développé deux techniques de mesures du drainage :

- Les « **cases ERLO** (érosion, ruissellement et lessivage oblique) » qui sont des « parcelles d'érosion » d'une centaine de m² en bas d'un versant à couvert végétal homogène (forêt ou savane), qui comporte à l'aval une fosse où on capte les eaux à circulation rapide à la surface des horizons moins perméables que les horizons susjacentes (voir fig. 8.2 et Roose, 1981). On évalue le drainage chaque semaine par calcul (Pluie = Ruiss. + ETR + Drainage au-delà des racines + variation du stock d'eau du sol). Par contre les caractéristiques chimiques et colloïdales des eaux de drainage à 50, 100 et 180 cm de profondeur informent sur les pertes par drainage des nutriments solubles et colloïdaux moyennes pour un versant.
- Les « **lysimètres de sols non remaniés** ». Il s'agit de cylindres en tôle galvanisée de 63 cm de diamètre et 50-100-180 cm de profondeur enfoncés dans le sol en place. Pour collecter le drainage nous avons sélectionné des cônes pleins de sable lavé et prolongés par un tuyau aboutissant à un fût en plastique enterré comportant un tuyau vertical dans lequel on pompe le drainage de la semaine (ou de la pluie exceptionnelle). Ici aussi on ne collecte que les eaux de drainage rapide. Si on tient à remonter l'eau stockée dans les micropores, il faut y ajouter un système de suction (pompe dont on maîtrise la dépression).
- Certains chercheurs se contentent de remplir une cuve avec du « sol reconstitué » mais ils ont détruit la structure du sol et modifié les circuits d'écoulement, donc les charges solubles et solides. D'autres se contentent d'enfoncer des cellules de céramique avec un système de pompage sous les horizons concernés, mais ils ne recueillent qu'une partie de l'eau stockée dans les micropores donc un échantillon non représentatif de l'eau de drainage quittant le versant, ni de sa charge soluble.
- Pour tester l'efficacité de divers drains (cônes, tiroirs, tuyaux éventrés) nous avons enterré vers 1 m de profondeur seize capteurs/lysimètres dans un sol ferrallitique sableux le plus homogène possible. Nous avons été très surpris de constater qu'après

une irrigation de 100 mm sur un sol déjà saturé, le drainage variait de 20 à 60 % ! En déterrants les lysimètres, nous avons observé que ces variations dépendaient des traces de vieilles racines pourries ou de trous de vers de terre ou de rongeurs. Pour tenir compte de l'extraordinaire variabilité de la perméabilité des sols, nous avons installé, puis testé 90 lysimètres de 50 à 180 cm de profondeur sur une diagonale climatique depuis les forêts sempervirentes des alentours d'Abidjan jusqu'aux savanes arbustives de Ouagadougou comparées avec les cultures de ces zones compatibles avec la taille des cylindres. Le volume annuel du drainage peut atteindre 1000 mm en zone subéquatoriale, à moins de 20 mm en zone soudano-sahélienne. De même les nutriments (C, N, P, Ca, Mg, K) varient beaucoup depuis les milieux naturels jusqu'aux cultures intensives avec fort apport d'engrais (voir chap. 7). Notons l'impact des apports d'azote nitrique qui chassent les bases (Ca, Mg, K) et acidifient les sols si les apports sont trop abondants pour les besoins des plantes cultivées et si les pluies sont surabondantes. Ainsi sous la bananeraie d'Azaguié en Côte d'Ivoire, les pertes en nutriments atteignent >50% des apports en azote, 30 % des apports de potasse, 10 % du phosphore (complexé aux hydroxydes de fer et d'alumine) et 80 % du Ca et Mg apportés par 1000 kg/ha de dolomie en tête de plantation. En conséquence, les apports d'irrigation ont été réduits dès que les pluies suffisent et les apports d'engrais solubles ont été répartis durant l'année en dehors des périodes les plus pluvieuses et en fonction des besoins des bananiers. Enfin, on a tenté de couvrir le sol pour réduire le ruissellement/l'érosion et capter une partie des nutriments disponibles dans le sol suite à la minéralisation par les microbes des déchets de culture enfouis à la plantation.

- Une douzaine de cases ERLO ont été installées depuis les forêts denses humides d'Abidjan, la bananeraie d'Azaguié (Côte d'Ivoire), jusqu'aux savanes soudano-sahéliennes près de Ouagadougou (Burkina Faso). Les écoulements recueillis concordent bien avec les événements pluvieux et l'humidité préalable du sol : le drainage est d'abord plus abondant dans les horizons superficiels, puis en profondeur ; il est plus chargé en début de saison des pluies qu'en fin de saison quand le drainage oblique est plus abondant. Les charges en nutriments sont largement plus abondantes sous cultures fertilisées que sous savane et même que sous forêt. En zones sub équatoriales, les pertes par drainage ($Dr = 1000$ mm) et en nutriments lixiviés sont abondantes pendant 8 à 10 mois. Dans les zones soudaniennes, les pluies et les nutriments entraînés par les eaux de drainage, sont concentrés sur 4 à 5 mois. En zones sahéliennes, les pluies sont rares ou peu abondantes si bien que les transferts de nutriments par drainage sont peu abondants sauf lors des pluies exceptionnelles.

En conclusion,

- Le pH du sol ne peut être corrigé en une fois : comme la chaux et la dolomie doivent généralement être importés, les paysans apportent du fumier, de la biomasse ou du compost parfois enrichis en dolomie (carbonates de Ca et Mg) ou de roches volcaniques pilées qui sont mélangés par le labour avec l'horizon humifère.
- Etant donné que d'ordinaire les sols tropicaux sont carencés en azote, en phosphore (fixé par les carbonates ou les hydroxydes de fer ou d'alumine) et parfois en potassium, calcium et magnésium, il faut les apporter au sol en fractions tenant compte des besoins des plantes, de l'abondance des pluies et du niveau de production désiré.

• Bibliographie

Roose E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et Doc. de l'ORSTOM n° 130, Paris, 570 p.

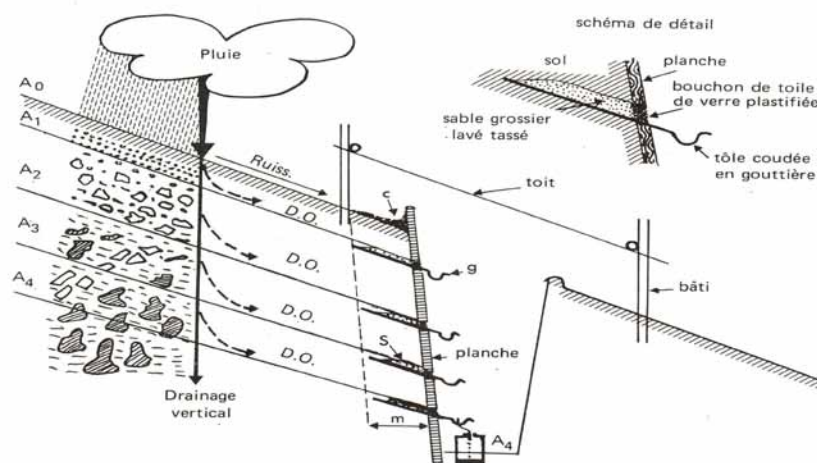
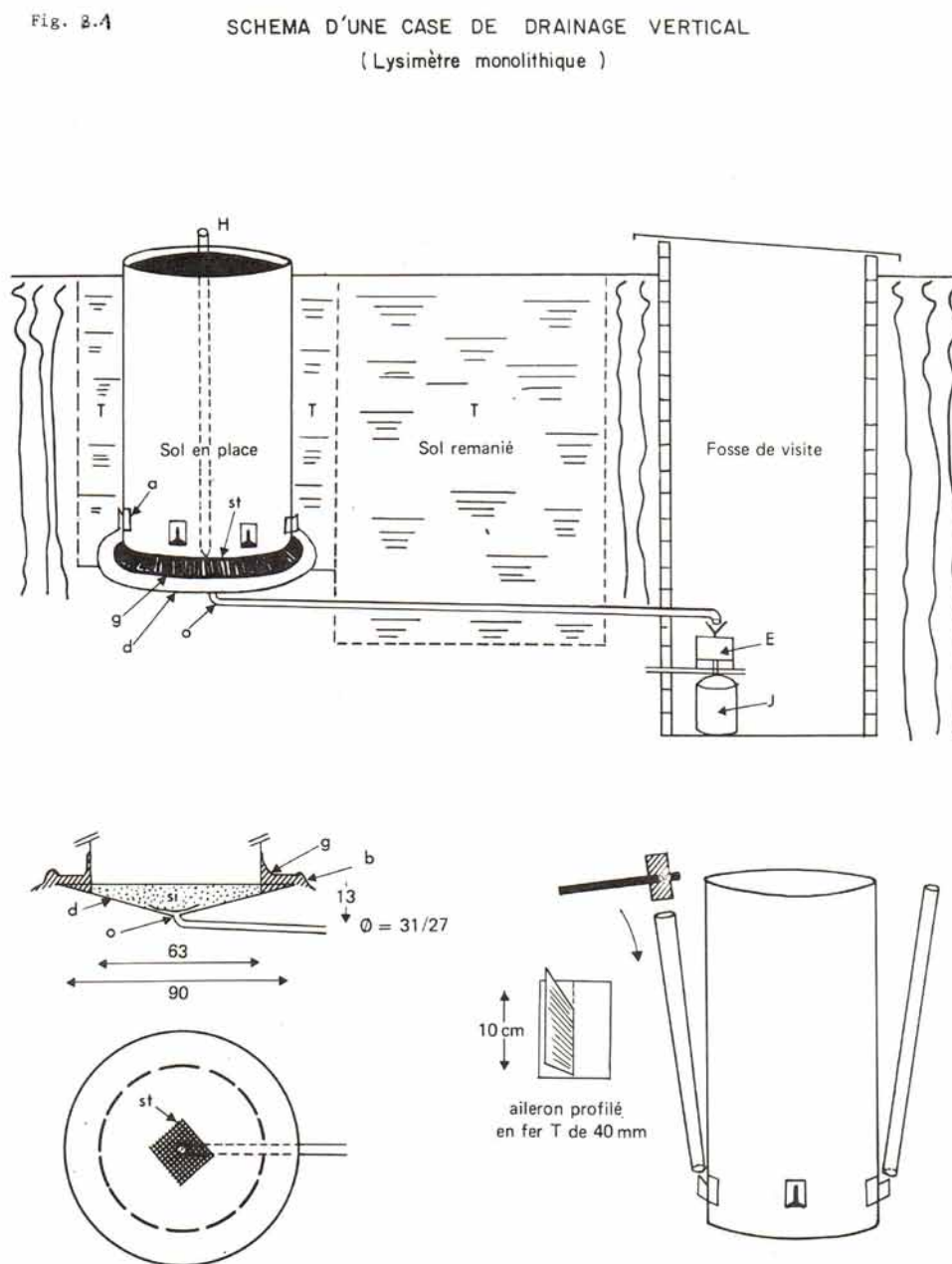


Fig. 2-2 SCHÉMA D'UNE CASE DE LESSIVAGE OBLIQUE (ERLO DE AZAGUIE)

Figure 8.1. Schéma d'une case de drainage vertical (d'après Roose, 1981)



Chapitre 9

La restauration de la productivité des sols tropicaux

9.1. Introduction : pas de conservation sans restauration des sols.

Pour les écologues, la restauration au sens stricte consiste à interrompre les processus de dégradation pour permettre au milieu naturel de retrouver les conditions primitives du sol, de la flore et de la faune (Aronson et al., 1995). Lorsqu'on a dépassé certains seuils irréversibles de dégradation, on est obligé d'intervenir énergiquement pour réhabiliter un système dégradé vers un écosystème que l'on suppose équilibré. On parle de *réallocation* si on destine la terre à un nouvel usage, par exemple une plantation de coton ou d'eucalyptus dans une zone de savane.

Dans cet ouvrage, il s'agit d'intervenir dans un agrosystème pour créer les conditions physiques, chimiques et biologiques qui permettent de restituer, ou de créer, la capacité optimale de production des cultures dont les populations croissantes en ville et à la campagne ont grand besoin. Il s'agit d'une approche agro-pédologique, basée sur la gestion de l'eau, de la biomasse (y compris la microflore) et des principaux nutriments pour lutter contre la faim dans le monde (900 millions de personnes vivent en 2022 sous le niveau minimum de nutrition). Nous avons gardé le terme des pédologues anglophones de « soil restoration » là où les écologues francophones parleraient plutôt de réhabilitation du milieu en vue d'un nouvel agrosystème.

Etant à la fois agro-pédologue et forestier des régions chaudes, j'ai d'abord observé la diversité du milieu forestier et la différence avec les cultures avoisinantes (cartographie des sols), avant de mesurer sur une transversale d'Afrique Occidentale depuis la forêt dense humide (Abidjan) jusqu'à la savane soudano-sahélienne (Ouagadougou), les risques de pluies, de ruissellement et d'érosion, puis de drainage et de lixiviation des nutriments en fonction du climat (pluies de 2200 à 700 mm), du couvert végétal naturel ou cultivé, des techniques culturales (buttes, billons, travail réduit du sol, fertilisation organique et minérale, etc.) sur les vieux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux.

L'analyse des milliers de données à l'aide du modèle USLE (Wischmeier et Smith, 1968) a montré sur quels facteurs intervenir pour réduire efficacement l'érosion en nappe et développer des agrosystèmes durables : par ordre d'efficacité (d'après Roose, 1994) :

*le couvert végétal au ras du sol : C=1 sur sol nu à 0,001 sous litière
(facteur1000)

*la pente de 1 à 50 % SL= 0,1 à 25 (facteur 250)

*les techniques culturales P =1 à 0,1 (facteur 10)

*L'érodibilité des sols K =0,1 à 0,7 (facteur =7)

On constate que la couverture du sol par une abondante biomasse (située près du sol) permet de réduire au mieux l'érosion. Les paysans avaient donc bien raison de se méfier des techniques de terrassement imposées par les technocrates de la conservation des sols qui non seulement réduisent peu l'érosion mais surtout exigent un travail sans commune mesure avec la faible augmentation observée de la productivité globale des champs.

Dès lors, nous avons passé des années à évaluer avec nos collègues chercheurs et paysans les techniques traditionnelles de gestion de l'eau et les systèmes de cultures sur les collines et les montagnes du Maghreb (Algérie, Maroc), d'Afrique occidentale (Cameroun, Burkina Faso, Mali), d'Afrique centrale (Rwanda, Burundi) et d'Amérique centrale (Martinique, Haïti) pour déterminer les techniques traditionnelles les mieux adaptées et les techniques modernes qui pourraient valoriser à la fois la terre et le travail tout en améliorant l'environnement.

Sous la pression démographique, les paysans, les citadins et les industriels défrichent chaque année de nouvelles terres, augmentant ainsi le ruissellement et l'érosion par 100 à 1000 (Roose 1973, 1994). Il est donc nécessaire de réduire ces pertes en eau et nutriments en structurant la surface des versants et des vallées par les techniques conventionnelles de gestion des eaux de surface : fossés ou banquettes d'infiltration ou de diversion, terrasses progressives ou en gradins, billons et labours en courbes de niveau, seuils dans les ravins. Mais les recherches ont démontré que si ces techniques de terrassement peuvent être utiles pour réduire les risques d'érosion, elles coûtent très cher en travail, réduisent les surfaces cultivables et augmentent peu les rendements dès lors que les cultures épuisent très vite les stocks de nutriments assimilables par les plantes. Par ailleurs, pour que les paysans acceptent de réaliser ces projets, il faut qu'ils y trouvent un salaire et une rente durable pour l'entretien de ces aménagements du paysage. **La conservation des sols est donc nécessaire, mais pas suffisante pour intensifier la production : il faut restaurer les propriétés du sol,** gérer les eaux de surface, développer des systèmes de production capables de produire une abondante biomasse pour nourrir la population microbienne du sol, réduire le travail du sol et apporter les compléments nutritifs nécessaires pour contrebalancer les exportations par les fruits des cultures et de l'élevage. **Les apports organiques (compost, fumier, paille) sont très importants pour revitaliser les horizons humifères superficiels, mais insuffisants**

pour atteindre une production optimale, car ils sont relativement pauvres en minéraux, surtout en phosphore (König, Roose, 2017).

De même, ***il ne peut y avoir de restauration sans conservation des sols*** car en milieu tropical chaud et humide, le stock de matières organiques du sol évolue très rapidement s'il n'est pas entretenu : il perd 50 % de son humus en 4 à 10 ans suivant la texture sableuse du sol et le mode de gestion de la biomasse (Roose, 1994). Il faut donc réduire toutes les « fuites » du système de production : conserver sur place l'eau de pluie, les nutriments des résidus de culture, la biomasse indispensable à nourrir la vie du sol. Comme nous l'avons développé au chapitre 7 au Rwanda et Burundi, il est possible de développer des systèmes de conservation de l'eau et des sols moins coûteux, mieux adaptés aux techniques traditionnelles des populations survivant sur les montagnes et les collines : paillage, gestion des adventices, fumure organique complétée par les éléments minéraux trop rares dans les sols tropicaux (P, N, parfois K, Mg, Ca). La restauration des sols doit aboutir à l'amélioration des propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols capable d'augmenter très significativement la production et le niveau de vie des paysans (moins de travail et plus de ressources financières). Ce n'est que dans ces conditions d'amélioration de ses ressources que le paysan pourra cesser de détruire la forêt tropicale, modèle de biodiversité, ainsi que d'autres milieux tropicaux.

Nombreux sont les techniciens chargés de la conservation de l'environnement qui ont été ***inspirés par le modèle des forêts***. Grâce à leur biodiversité, les forêts amassent les nutriments libérés par l'altération des roches ou perdus dans le drainage profond, séquestrent une masse impressionnante de carbone dans sa canopée, son bois et sa litière, alimentent par sa litière et ses racines profondes les populations microbiennes et animales qui produisent l'humus, lequel stocke l'eau et les nutriments indispensables à la vie des végétaux.

D'où les efforts des forestiers pour reforester les zones surpâturées ou dégradées par les cultures (DRS en montagnes méditerranéennes). La culture biologique et la permaculture refusent les engrais chimiques et les pesticides, mais favorisent l'agroforesterie qui tente d'augmenter la production de biomasse recyclée par les animaux (fourrages) ou directement par le « microbiote du sol » (paillage ou enfouissement des engrais verts).

Partant de la constatation que « la conservation des sols déjà dégradés » n'améliore guère la productivité des champs, (condition pour que les paysans acceptent et entretiennent les aménagements antiérosifs) et nous inspirant des techniques traditionnelles et du modèle forestier, nous avons développé une approche globale à l'échelle des parcelles, de l'exploitation et de l'ensemble du versant (la GCES), en vue d'améliorer le milieu en même temps que le niveau de vie des paysans. La restauration des

sols comportera une gestion raisonnée des eaux disponibles, l'amélioration de la fertilité du sol et la gestion de la biomasse en vue d'optimiser la productivité de la terre et du travail des paysans.

9.2. Réduire les fuites du versant

Avant toute intervention pour intensifier la productivité des agrosystèmes, il faut réduire les causes locales de la dégradation des sols :

- Réduire l'érosion en nappe en augmentant la biomasse qui intercepte l'énergie des pluies en couvrant la surface du sol (cultures associées, arbres, paillage, gestion des adventices, planter tôt et dense, etc.) ;
- Réduire le ruissellement et le ravinement en couvrant les champs et en organisant les chemins d'eau (ralentir les écoulements de pointe, favoriser l'infiltration et réduire les surfaces «bétonnées» quasi imperméables) ;
- Réduire les pertes de nutriments par les eaux de drainage : fractionner les apports d'engrais organiques et minéraux en fonction des besoins aux différents stades physiologiques des plantes cultivées et des risques de pluies abondantes;
- Réduire les transferts de nutriments par l'exportation des résidus de récolte (fourrage, compost/fumier ou paillage). Les engrais organiques et minéraux coûtant cher, il faut donc veiller à leur assimilation rapide par les végétaux dans ce milieu tropical à faible capacité de stockage.

9.3. Gérer les eaux disponibles en fonction du milieu/climat

***En milieu aride** (pluies < 3 mois), capter le ruissellement des versants et le concentrer sur les meilleures terres des vallées pour compléter l'irrigation avec les eaux de nappe.

***En milieu tropical sec** (Pluies = 700 à 300 mm en 4 à 6 mois), stocker le ruissellement (mares) sur les zones cuirassées, dégradées, améliorer l'infiltration sur les terres les plus fertiles (cordons de pierres, haies vives, agroforesterie, labour ou billonnage en courbe de niveau, paillage).

*** En milieu tropical humide et équatorial** (Pluies=800 à plus de 1500 mm en 10 mois), couvrir la surface du sol pour alimenter les nappes, ralentir le ruissellement (cultures couvrantes, haies vives) agroforesterie pour augmenter l'évapotranspiration et organiser les chemins d'eau pour évacuer sans dégâts les excès temporaires lors des averses tropicales.

* *En montagne et sur les collines convexes à pente forte*, absorber le maximum des eaux de pluie, ralentir le ruissellement et organiser des chemins d'eau bien protégés jusqu'aux axes de drainage naturel.

9.4. Améliorer le milieu vivant : revitaliser la terre

**Le travail du sol répété accélère la minéralisation des MO du sol, dégrade sa structure* (battance en surface, tassement en profondeur, réduction de sa capacité de stockage de l'eau et des nutriments), réduit sa capacité d'infiltration et augmente sa sensibilité à l'érosion et aux déficits hydriques. Depuis des siècles les paysans restaurent la structure du sol par des labours de plus en plus profonds. Mais sans stabilisateur, cette porosité utile n'est pas stable : il faut donc enfouir de la chaux, dolomie ou gypse et des matières organiques pour favoriser les activités biologiques du microbiote du sol (résidus de culture, compost, fumier) et de sa faune fouisseuse (vers, termites, fourmis, etc.). Mais le travail du sol chamboule profondément l'habitat des vers de terre et autres fouisseurs qui creusent des galeries stables enrobées de mucus par lesquelles les eaux de surface s'infiltrent rapidement en profondeur.

* Traditionnellement, une fois dégradés, les champs sont abandonnés à *la jachère naturelle* (souvent broutée par le bétail en liberté) ou améliorée par des légumineuses. Mais pour restaurer un niveau suffisant la fertilité du sol, il faut de 5 à 30 ans de jachère ce qui n'est plus possible même en Afrique où la pression démographique entraîne une forte pression sur le foncier.

* Pour détruire la compacité du sol, gérer les adventices, enfouir les résidus de culture, le fumier et le compost, on est souvent obligé de labourer (au moins localement à la dent sous-soleuse) la première année, de semer la culture principale, puis au premier sarclage de semer dans l'interligne une plante de couverture, fourragère ou une culture secondaire, qui ne concurrencera pas trop la culture principale.

En saison sèche, les résidus de culture, adventices et plantes de couverture se dessèchent sur place, sont broutés par le bétail, mais se resèment et offrent un bon tapis végétal dès les premières pluies. Il est alors possible de replanter sans retourner le sol sous une litière qui protège la terre contre l'énergie des orages du début de la saison des pluies (mini ou zéro-labour).

9.5. Gérer la biomasse et la fertilité du sol

Diverses expériences en Afrique ont montré que chaque paysan qui collecte ses résidus de culture, les déchets du ménages et la biomasse disponible sur son exploitation et les transforme en fumier/compost, ne peut fumer correctement qu'un tiers de sa surface cultivée (Guérin et Roose, 2017).

Pour entretenir la productivité de sa terre (1 à 5 ha), le paysan tropical ne dispose que de la biomasse produite sur sa terre, le long des chemins et sur les parcours communaux. Il doit la répartir entre les besoins en fourrages de ses animaux (restitution de 10 à 30% par le fumier), le compost, le feu et le paillage de ses champs. Cependant, si le sol issu de roche pauvre est carencé (généralement en phosphore, azote et bases + oligo-éléments), il est logique que les plantes qui y poussent soient aussi carencées, de même que le compost et les poudrettes... Les expériences de König, Ndayizigye au Rwanda et Rishirumuhirwa au Burundi (voir chap. 2.1, 2.2) montrent bien que l'apport de 10 et même 20 tonnes/ha de fumier de ferme améliore considérablement le pH, la structure et les propriétés physiques et biologiques du sol ; mais pour obtenir l'optimum de production de céréales, l'apport de MO doit être complété par des engrais minéraux beaucoup plus concentrés et faciles à fractionner en fonction du climat et des besoins des cultures.

9.6. Nourrir les plantes cultivées plutôt que les sols

Les sols tropicaux les plus courants ont un stock important de minéraux mais ces nutriments sont délivrés trop lentement sous une forme assimilable pour les plantes.

Le phosphore, est généralement bloqué par les carbonates, les hydroxydes de fer et d'alumine ou par des pH très acides des sols. Il est peu abondant dans les roches africaines sauf les carbonates du Maroc, du Sénégal et du Togo. Il est généralement apporté sous forme de poudre de phosphate bicalcique que l'on enfouit dans le fumier ou le compost. Il participe à la correction des pH acides. Il est peu mobile dans les eaux et se concentre dans les grains des céréales : le phosphore est peu abondant dans la biomasse.

L'azote, indispensable pour la synthèse des protéines, se concentre dans les graines, mais se retrouve à faible dose (1%) dans les litières, le compost et le fumier (10 tonnes de fumier de ferme apporte 100 kg d'azote). Les légumineuses peuvent fixer jusqu'à 300 kg d'azote de l'air, d'où leur intérêt comme plante associée aux céréales et plantes de jachère améliorante fournissant d'excellents fourrages. L'azote apportée sous forme d'urée ou d'ammoniaque évolue rapidement en nitrites et nitrates, seuls absorbés par les plantes, mais redoutables en tant qu'acides forts qui dégradent le sol, chassent les bases et l'aluminium du réseau des argiles et forment un poison pour la plupart des plantes (sauf ananas et hévéa, acidophiles) : d'où la mauvaise réputation des engrais « chimiques ou industriels ». Il faut donc les utiliser à petites doses fractionnées en fonction des besoins des plantes et des risques de lixiviation par les eaux de ruissellement et de drainage (hors des périodes les plus pluvieuses).

Les bases (K+Ca+Mg) : ces cations sont indispensables pour assurer la structure des plantes, le stockage de l'amidon dans les racines, et le Mg dans la photosynthèse. Malheureusement ils sont très solubles et chassés des argiles (kaolinite à faible capacité d'échange) par les eaux acides (humus), par les engrais azotés et autres acides forts. On retrouve les bases dans les bananiers, les tiges des céréales, dans les composts et fumiers, les troncs et canopées des arbres. Pour corriger l'acidité des sols, le transfert de biomasse des parcours par les animaux, le recyclage des adventices et divers résidus végétaux, ralentissent l'acidification au-delà de pH 5, mais pour neutraliser l'acidité, on fait généralement appel à des épandages massifs de chaux éteinte, de marne, de calcaire broyé ou de gypse. Là aussi on a avantage à fractionner les doses pour réduire les pertes par lixiviation et à améliorer la teneur en humus du sol.

9.7. Conclusions

L'observation des techniques traditionnelles de restauration de la productivité des terres africaines (voir fig 3.1 : le zaï) et la recherche de techniques modernes valorisant les investissements en intrants et en travail, nous ont montré que la restauration de la productivité des sols tropicaux est possible en 1 à 3 ans, mais exige de respecter en même temps, six règles fondamentales (Roose, Bellefontaine, Visser, 2011) :

1. Organiser des structures de gestion de l'eau les plus simples possibles (lignes végétales de défense, cordons de pierres, haies vives) adaptées au climat et aux habitudes des sociétés rurales. Sans ces pièges, le ruissellement emporte la fumure et l'humus du sol et empêche toute intensification de la production.
2. Décompacter les macropores du sol pour améliorer la circulation de l'eau et de l'air : casser les croûtes calcaires /ferrugineuses pour favoriser l'enracinement profond. Puis réduire le travail du sol et le couvrir de biomasse.
3. Revitaliser l'horizon humifère par un apport de fumier ou compost riche en microbes capables de transformer la biomasse en humus et d'améliorer l'assimilabilité des minéraux du sol (en particulier les phosphates et oligo-éléments).
4. Corriger le pH du sol entre 5 et 7.5. Au-dessous du pH 4.8, l'aluminium devient soluble et toxique. Au-dessus de pH 8, le phosphore forme des sels peu solubles avec le fer, l'alumine libre et le calcaire.
5. Nourrir les plantes cultivées. Il est trop coûteux de corriger toutes les carences du sol : les risques d'érosion et de lixiviation sont trop importants en région tropicale. Par contre, il est très important d'apporter des compléments minéraux fractionnés en fonction des besoins des plantes et des risques de lixiviation. Les sols tropicaux sont généralement carencés en N et P. L'azote peut être apporté par une culture de légumineuse (Jusqu'à 300 kg/ha/an) à condition que le sol ne soit pas trop acide ou

pauvre en phosphore. Localement les phosphates de calcium sont finement broyés, mélangés au compost/ fumier et enfouis en fumure de fond.

6. Sélectionner des systèmes produisant une abondante biomasse couvrant rapidement le sol et améliorant l'humus : plantation précoce et dense, association des légumineuses aux céréales, favorisant la vie microbienne et celle des animaux fousseurs.

Ainsi la restauration accélérée de la productivité des sols tropicaux est possible en 1 à 3 ans, mais elle a un coût : du travail, des transports, de la biomasse et des compléments minéraux aux engrais organiques.

Mieux vaut prévenir (limiter les pertes) que guérir (restaurer).

Bibliographie

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pontanier R., 1995. Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones semi-arides. In « l'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ? Paris, John Libbey Eurotext : 11-30.

Aubert Cl., 2021. L'azote indispensable et destructeur. Biocontact 21. In « Les apprentis sorciers de l'azote : la face cachée des engrais chimiques » Ed. Terre Vivante.

Guérin H., Roose E., 2017. Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique Occidentale. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux... » IRD Editions : 161-178.

Hinsinger Ph., Ndour Y., Becquer Th., Chapuis-Lardy L., Masse D., 2017. Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux ... » IRD Editions : 329-342.

König D., 2017. Potentialités de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux ... » E.Roose Eds., IRD Editions : 613-624.

Ndayizigiye Fr., 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In E.Roose Eds., « Restauration de la productivité des sols tropicaux ... » IRD Editions : 591-604.

Rishirumuhirwa Th., 2017. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux ... » E.Roose Eds, IRD Editions, Marseille : 211-222.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique FAO*, 70, 420 p.

Roose E., Bellefontaine R., Visser M., 2011. Six rules for the rapid restoration of degraded lands. Synthesis of 17 case studies in tropical & mediterranean climates. *Sécheresse*, 22, 3 : 1-12.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie. IRD Editions, 712 p.

Chapitre 10

Conclusions sur la lutte antiérosive et la restauration de la fertilité des sols, d'après les travaux de Roose (1964-2008)

1. Problématique :

* Y a-t-il moyen de nourrir la population des pays tropicaux sur les terrains en pente densément peuplés sans dégrader l'environnement ?

* L'hypothèse de départ, c'est que la dégradation de la productivité des sols dépend (entre autres) de l'érosion et de la lixiviation par le drainage.

2. Nous avons concentré nos recherches sur la phase initiale de l'érosion (l'érosion en nappe et rigoles) car on a observé que la dégradation de la productivité des sols tropicaux (en particulier les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux) commence dès la deuxième année après le défrichement aboutissant à l'abandon des champs à la jachère après 4 à 10 ans de cultures.

* L'analyse des causes et des facteurs de l'érosion, puis de la lixiviation des nutriments, est basée sur les résultats des observations sur des dispositifs expérimentaux disposés le long d'une transversale bioclimatique depuis la forêt dense humide (climat équatorial d'Abidjan) jusqu'à la savane soudano-sahélienne (climat semi-aride de Ouagadougou).

* Il en ressort que l'érosion en nappe, même limitée à 4 mm, entraîne une baisse de 40 % du rendement des céréales.

* Certes la topographie du paysage a un rôle important sur le volume de terre érodée, mais la couverture végétale de la surface du sol est bien plus efficace pour intercepter l'énergie des pluies et maintenir la capacité du sol d'infiltrer l'eau et de produire la biomasse.

* Pour un agronome, la lutte antiérosive doit donc s'organiser non seulement autour de la gestion des eaux de surface en fonction du climat, mais surtout à partir de la définition d'un système de production intensif couvrant totalement le sol pendant la saison où les pluies sont dangereuses.

*Nous avons réussi à réduire l'érosion de plus de 250 t/ha à 2 t/ha/an sous cultures et le ruissellement à moins de 2 % des pluies, en combinant des haies vives et des cultures associées paillées sur des pentes de plus de 30 %.

* Mais, à notre grande surprise, la protection de ces sols contre l'érosion n'a pas suffi à augmenter la production des cultures. L'apport de 10 t/ha/an de fumier (la dose max. produite sur une petite ferme) a modestement augmenté le rendement des cultures et amélioré le pH des sols. Pour atteindre une production satisfaisante pour nourrir la grande famille (40 quintaux de maïs) et vendre quelques excédants en ville, il a fallu compléter la fumure organique par des apports minéraux (phosphore, azote, potasse et dolomie).

3. Difficultés supplémentaires.

*Durant une deuxième phase, nous appuyant sur les résultats de parcelles d'érosion et sur une centaine de lysimètres, nous avons montré que les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, sableux en surface, retiennent très mal les nutriments solubles (N, K, Ca, Mg). Par ailleurs le phosphore est rapidement rendu peu soluble et donc peu disponible pour les plantes, du fait de sa combinaison avec le fer et l'alumine libres, abondants dans ces vieux sols.

*L'utilisation des légumineuses comme plantes de couverture, haies vives ou arbres d'ombrage, peut aider à fixer jusqu'à 250 kg/ha/an d'azote de l'air, mais à condition que le sol ne soit pas trop acide et qu'il dispose de phosphore assimilable : là encore, la microflore du sol est indispensable pour solubiliser les minéraux contenus dans les roches et les MO du sol.

*** Il faut donc combiner la fumure organique disponible (avec sa microflore) avec les engrais minéraux pour atteindre des rendements suffisants pour nourrir les populations rurales et urbaines qui doublent tous les vingt ans.**

*Tous ces résultats ont été acquis sur des petites surfaces (1 à 200 m²). Pour vérifier leur application à l'échelle des champs et des terroirs, il a fallu passer à des enquêtes villageoises dans des environnements variés. Nous avons fait appel à nos amis, collègues, thésards et autres chercheurs locaux qui nous présentent en deuxième partie les conclusions de leurs observations et recherches en milieu tropical ou méditerranéen montagnard ou collinaire, à forte population, en particulier en Afrique de l'Est, du Nord et dans les Caraïbes.

Deuxième partie : témoignages

Douze études de cas par 25 coauteurs et Roose

Chapitre 11

LES TECHNIQUES TRADITIONNELLES DE LUTTE ANTIEROSIVE ET DE RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITE DES SOLS AU RWANDA

NDAYIZIGIYE Fr., NYAMULINDA V., ROOSE E.

E-mail: ndafranco@gmail.com

Introduction.

Malgré les famines et les guerres intestines, la population rwandaise n'a cessé de croître à un rythme extrêmement rapide : estimée à un million d'habitants au début du siècle, 2,6 millions en 1962 malgré deux famines, plus de 7 millions en 1992, la population aurait atteint 10 millions vers l'an 2000 sans « les événements ». Le taux de croissance est l'un des plus élevés du monde (3,2%). En 20 ans, la population a plus que doublé, atteignant 400 à 800 habitants/km² selon les régions. La croissance économique ne peut plus suivre la croissance démographique. La population paysanne a dépassé les limites de la pauvreté : la taille moyenne des exploitations est inférieure à 0,8 ha et plus de 25 % des familles doivent survivre sur moins de 0,4 ha (Roose, Ndayizigiye, Sékayangé, 1993).

L'une des caractéristiques marquantes de la société rwandaise est la très large dissémination de l'habitat d'une grande partie de la population sur les collines et les plateaux du pays. Les villes ne renferment qu'environ 18% de la population totale. Les vallées et les bas fonds, longtemps réservés à l'élevage et parfois aux reboisements d'eucalyptus, sont aujourd'hui colonisés par une agriculture intensive.

Vivant sur un territoire très exigu, le peuple rwandais n'a assuré sa subsistance que grâce à une agriculture et un élevage peu intensifs utilisant des pratiques traditionnelles qui ont progressivement abouti à la réduction de la fertilité du sol ayant pour conséquence la diminution de la production des cultures. Ainsi, la régression de la jachère et la surexploitation des sols qui, jointes à la topographie très pentue, à la forte intensité des pluies et à la fragilité de certains types de sols, ont constitué les facteurs déterminants une importante érosion et une diminution considérable de la fertilité des sols.

Confrontés à cette situation de manque de terre et de dégradation des sols, les fermiers ont recours à des pratiques de gestion du milieu qui permettent de réduire

l'érosion et d'augmenter la production en étendant la surface cultivée. Mais la pression démographique devenant de plus en plus forte, après chaque héritage, les exploitations « en lanières » se sont amenuisées et les sols très sollicités sont devenus très pauvres et fragiles.

Les grands troupeaux de bovins ont été refoulés vers les hautes terres et les savanes de l'Est, tandis que les agriculteurs possèdent quelques petits animaux élevés en stabulation pour produire du fumier et du lait. Le problème majeur de ce pays sans grande ressource minérale ni commerciale, est d'assurer à cette population très dense, l'autosuffisance en aliments et en bois, sans dégrader ces « paysages de mille collines » à pentes fortes. Dans ce chapitre, sont décrites les pratiques traditionnelles de gestion conservatoire de l'eau et de restauration de la productivité des sols et sont proposées quelques améliorations.

1. Les techniques de gestion conservatoire de l'eau.

L'agriculture traditionnelle rwandaise est principalement pluviale, même si dans les bas fonds, certaines pratiques peuvent être assimilées à l'irrigation. Le fermier doit attendre l'arrivée des pluies pour préparer ses champs ; mais à d'autres périodes de l'année, il doit aussi faire face à des pluies diluviennes qu'il faut gérer pour le bénéfice des cultures et la sauvegarde de l'environnement en luttant notamment contre l'érosion. Pour ce faire, il a eu recours à diverses techniques qui ont été progressivement améliorées.

1.1. Des chicanes en mottes d'herbes + haies d'arbustes et graminées aux bandes enherbées + haies vives d'arbustes

Sur les versants pentus, les paysans arrachaient les mottes d'herbes et les disposaient en chicanes suivant plus ou moins les courbes de niveau. Ils y plantaient aussi des haies d'euphorbes (*Euphorbia tirocali* = *umuyenzi*) ou de grandes graminées (*Hyparhenia* = *umukenke*) pour renforcer le système. Après un certain temps, la pente s'atténue et le paysan en cultivait la partie inférieure, après l'avoir protégée par un fossé pour ralentir l'écoulement des eaux.

Aujourd'hui, ce dispositif a été amélioré en installant, suivant les courbes de niveau et à des écartements différents selon le degré de la pente, des bandes enherbées avec des graminées fourragères (*Setaria*, *Tripsacum*, *Vetiver*, *Pennisetum*) ou des haies vives d'arbustes légumineux (*Leucaena*, *Sesbania*, *Calliandra*) à usages multiples (bois de tuteurs, fourrage, engrais vert, paillage, bois de feu).

Ces haies arbustives et bandes enherbées utilisées sur des terrains à faibles pentes (inférieures à 15 %) permettent d'obtenir progressivement des terrasses peu pentues avec des talus stables après un temps relativement court (3 à 5 ans) quand les parcelles sont régulièrement cultivées à la houe dans le sens de la pente et les structures bien entretenues (tailles et/ou coupes régulières).

1.2. Des fossés en bordure supérieure des champs aux fossés isohypses cloisonnés renforcés par des bandes enherbées: formation de terrasses progressives

L'agriculteur a toujours utilisé des fossés, soit pour capter et infiltrer l'eau de ruissellement, soit pour évacuer les quantités d'eau indésirables au niveau du champ.

En haut de chaque parcelle, l'agriculteur terminait le labour par un fossé large d'environ 30 cm et d'une profondeur de la hauteur d'une houe (environ 20 cm), dont la fonction principale était de capter et d'infiltrer des éventuels écoulements d'eau venant des parcelles situées en amont, et aussi y déposer les résidus de sarclage qui allaient servir de fumure

organique à la saison suivante. Ce fossé pouvait constituer une structure antiérosive même s'il ne suivait pas toujours la courbe de niveau. Ce fossé était régulièrement détruit et remplacé par un nouveau fossé de même dimension à chaque labour de la saison.

Aujourd'hui, les fossés suivent les courbes de niveau à des équidistances régulières, et sont plus larges (40 cm) et plus profonds (30 à 50 cm), cloisonnés tous les 5-10 m pour forcer l'eau à s'infiltrer sur place ; ils sont protégés en amont par une bande enherbée et/ou une haie arbustive qui retient les terres érodées sur la parcelle et permet la formation d'une terrasse progressive obtenue après 5 à 10 ans de culture continue.

Cependant, cette technique ne peut être utilisée que sur des terrains dont la pente n'excède pas 20 % et dont la profondeur du sol atteint 1 m au minimum. Elle n'est pas recommandée sur des terrains très pentus et argileux développés sur substrats schisteux ou volcanique. Sur ce type de terrains, l'expérience a montré que lors des tempêtes tropicales les fossés isohypses cloisonnés entraînaient d'importants glissements de terrains qui provoquent d'énormes dégâts sur les versants et dans les bas fonds. Outre son inefficacité à lutter contre l'érosion, cette technique demande un investissement considérable : environ 300 hommes-jours par hectare pour la mise en place, et 50 hommes-jours annuels par hectare pour l'entretien.

Dans ces situations, il a été recommandé d'utiliser des haies d'arbustes et des terrasses progressives. Ce qui a été jusqu'ici bien accueilli par les agriculteurs aussi longtemps qu'ils obtiennent un soutien (même sous forme de prêt) pour la mise en place de ces structures (production de plants d'arbustes et terrassement) et leur mise en valeur (fourniture d'intrants : fumure minérale, semences, produits phytosanitaires).

Même si l'érosion subsiste sur la parcelle entre deux haies, le risque de glissement de terrains a été nettement réduit. Et là où ces structures sont bien entretenues, très peu de sédiments érodés arrivent dans les bas fonds. Avec les terrasses radicales, l'érosion est réduite au minimum acceptable si les talus ne dépassent pas 2 m. Ainsi pour toutes ces structures, c'est l'entretien qui garantit la réussite.



Photo 1 : Champs avec haies d'herbesPhoto 2: Terrasses radicales en production**1.3. Des fossés de captage des eaux:**

Toute l'eau qui tombe sur les toits des maisons, sur les cours environnantes et sur les chemins ruisselle vers le bas côté et constitue une source importante d'érosion. Ces eaux forment des rigoles qui, peu à peu, se transforment en ravins qui à leur tour, quand elles arrivent dans des terrains friables, forment des crevasses béantes qui rendent la circulation très difficile. Pour limiter les dégâts, les paysans creusaient des fossés non loin de l'habitation pour les eaux ruisselant sur les aires habitées et en bordure des chemins dans le but de capter et d'infiltrer le maximum d'eau, et piéger les sédiments transportés par l'érosion (Photo 03).

Photo 3 : Fossé de retenue d'eau ruisselant sur les chemins, les toits et les cours des maisons

Les chemins sont alors modifiés et protégés par une haie d'herbes.

Photo 4: Chemin protégé par des haies d'herbes

Une fois que les eaux de ruissellement sont détournées, le ravin devient inactif et est progressivement colonisé par une végétation naturelle qui, cependant, ne bouche pas complètement le ravin.

Pour corriger correctement les ravins, on utilise des haies serrées d'arbustes à multiplication rapide et implantation par boutures (*Euphorbia tirucali*, *Dracaena afromontana*, bambous) au travers du passage des eaux. On y associe également des herbes et des branches pour piéger d'éventuels sédiments transportés par les eaux. Les haies sont distantes de 5 à 10 m en fonction du degré de la pente du terrain.

1.4. Des fossés le long des chemins:

Les eaux ruisselant sur les chemins qui traversent les exploitations sont dirigées dans des fossés antiérosifs là où ils existent ou dans des fosses creusées le long du chemin à intervalle de 10 à 20 mètres selon l'ampleur du phénomène. Elles sont de dimensions modestes (1 à 1.5 m de large et 0.40 à 0.70 m de profondeur) pour des raisons de faisabilité et d'entretien. Ces fosses sont généralement creusées au début de l'année culturale et servent à capter les eaux de ruissellement et les sédiments transportés sur les pistes. Elles sont creusées à l'écart du chemin pour la sécurité des usagers et y sont reliées par une petite rigole. Elles se remplissent en général au cours des deux saisons de pluies.

Certains paysans préfèrent planter des rejets de bananiers ou des arbres fruitiers dans ces fosses à moitié remplies au milieu de la deuxième saison de pluie pour faire profiter les plantations des riches sédiments accumulés et des eaux des pluies restant à venir dans la saison. D'autres fosses sont alors creusées ailleurs si cela s'avère encore nécessaire.

Pour d'autres agriculteurs, les fosses restent jusqu'à la prochaine saison culturale. Elles sont curées au moment du labour et les sédiments piégés sont enfouis dans le sol comme fumure organique.

C'est ainsi que l'on peut observer des paysages densément peuplés où les chemins qui relient les différentes habitations restent stables et cachés derrière une abondante végétation parce qu'ils sont minutieusement contrôlés et entretenus.

1.5. La gestion de l'eau et du sol dans les bas fonds

Les bas fonds sont un prolongement des terroirs centrés sur les collines et contenus entre la colline et la rivière. Il s'agit d'un espace spécifique exploité en tant qu'entité écologique cohérente dont la valeur essentielle du point de vue agricole réside dans la relation de complémentarité qui caractérise ces champs irrigués par rapport aux champs des collines consacrés aux cultures pluviales (Meschy, 1989).

Les agriculteurs drainent les terres inondées en permanence, irriguent les parties exondées en saison sèche en aménageant des planches, de gros billons (umutabo) de 2 à 4 m de large et de 10 à 20 m. de long, orientés perpendiculairement au cours d'eau dans la partie pentue à l'amont de la vallée, et parallèlement dans la partie aval, qui est inondée en permanence et peu inclinée. Les drains (umugende) et sillons (umusambya) séparant les billons permettent d'évacuer les eaux stagnantes et récupérer des terres pour les cultures pendant la saison sèche. Leurs dimensions dépendront de la lame d'eau, mais en général, elles sont plus importantes en aval (largeur=1.00 m et profondeur=0.70 m) où l'inondation est permanente, qu'en amont (largeur=0.70 m et profondeur=0.40 m).

Dans les lieux inondés uniquement en saisons des pluies, en limite des versants, les rigoles sont orientées de façon à capter dans les bordures des champs l'eau de pluie et la terre qui descendent des collines.

Lors d'une sécheresse prolongée, il arrive que l'eau soit localement retenue en obstruant les rigoles et/ou les sillons par la terre mélangée à des résidus de sarclage pour irriguer les cultures des billons (irrigation par submersion).

2. Les pratiques de gestion conservatoire du sol.

Dans le souci de conserver le sol, l'agriculteur a recours aux différentes méthodes culturales à savoir le labour grossier, la culture en buttes ou en billons et les terrassettes en escalier.

2.1. Le labour grossier :

Après un défrichement à la machette ou une courte jachère n'ayant pas développé une importante végétation, le sol est labouré à la houe en renversant les mottes, la partie avec les herbes vers le bas, et le sol n'est pas égalisé. Quand la pluie arrive, l'eau pénètre dans le sol par les orifices laissés entre les mottes, ce qui favorise l'infiltration des eaux de pluie et limite l'érosion. Cette pratique est très utilisée sur des terrains pentus dans les régions de montagne où l'on cultive beaucoup les petits pois (Nyamulinda, 1989).

2.2. Le labour dans le sens de la pente déplace pas mal de terre par le travail de la houe sur 25 cm depuis le bas du champ jusqu'au sommet de la colline. La houe déplace 30 à 52 t/ha lors du labour et 3 à 11 t/ha lors du sarclage. Sur ces fortes pentes (> 60 %) cette érosion aratoire est aussi importante que l'érosion en nappe (Wassmer, 1988)

2.3. La culture sur buttes :

Cette pratique est utilisée spécialement pour le manioc et l'igname, et parfois pour la pomme de terre, la patate douce et les colocases sur des sols peu profonds. Le sol est réuni en un grand tas de terre d'une base d'environ 1 m de diamètre et de 30 à 50 cm de hauteur. On y incorpore souvent des résidus de labour, de culture ou de déchets de ménage. Dans la plupart des cas, ces tubercules sont plantés en association avec d'autres cultures (haricot, maïs, soja). Les buttes sont disposées en quinconce, ce qui permet de ralentir et limiter le ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau, mais la pente des buttes accélère localement l'érosion (Roose, 1994).

2.4. La culture sur billons :

Comme les buttes, la pratique des billons est utilisée sur les sols peu épais, principalement pour les tubercules (le manioc, la patate douce et la pomme de terre) mais aussi pour les cultures potagères surtout sur les sols volcaniques et dans les bas fonds. Traditionnellement, les billons sont souvent faits perpendiculaires à la pente sur des pentes faibles à moyennes ; parfois même on leur donne une légère pente dans les régions où la pluviosité est abondante.

Sur des terrains très pentus (pente supérieure à 35 %), spécialement dans le Nord du pays et sur les coteaux des collines, certains agriculteurs font des gros billons dans le sens de la

penne pour donner libre cours aux eaux de ruissellement, parce que les billons perpendiculaires à la pente accumulent des eaux qui, quand il y a rupture de ceux-ci, emportent tout sur leur passage et provoquent d'importants dégâts dans les bas fonds. Ces gros billons sont couverts de cultures associées à développement successif ; les pierres ou les adventices couvrent les sillons limités par un horizon compact (Nyamulinda, 1989 ; Roose, 1994).

2.5. Les banquettes inclinées à drainage latéral sont formées de bandes de terre de 2-3 m de large et 30 m de long, entourées de gros billons à pente douce (<1%) drainant lentement les pluies excédentaires vers des drains naturels. Les bords inférieurs des billons sont plantés de *Paspalum* ou *Setaria*. L'effet de ces banquettes sur l'érosion et la production est notoire. L'infiltration est telle qu'on n'a jamais observé de ravine sur ces versants, même si les sols sont peu perméables, les pentes fortes sur schiste et les pluies intenses (Fournier, 1967).

2.6. Les terrassettes ou terrasses en escalier :

Dans la zone des montagnes du nord et de l'ouest du pays, sur des versants très raides, les paysans construisent des terrasses étroites (*utunyanamo*) pour faire des cultures associées de légumineuses (haricots, petits pois, pois cajan), de blé et de pomme de terre. Il s'agit de labourer des petites bandes de terre perpendiculairement à la pente, larges d'environ 1 mètre, séparées entre elles par un petit talus stabilisé par les mottes d'herbes. Le ruissellement et les sédiments provenant des parcelles cultivées en amont sont piégés par les cultures et les talus enherbés. Les cultures se succèdent sur les différentes parcelles dans une rotation que les paysans maîtrisent ; ils n'oublient pas de faire une courte jachère sur une saison quand cela devient nécessaire. Cette technique permettait de mieux gérer le sol et les eaux sur ces fortes pentes : le traitement en micro-terrassettes réduirait l'érosion de 96% par rapport au témoin travail à la houe et augmenterait la production de pommes de terre de 4,5 à 9,5 t/ha. Mais le risque de glissement de terrain lors des tempêtes et l'épuisement des sols exigeant des amendements chimiques posent souvent de gros problèmes.



Photo 11.5 : Terrassettes sur fortes pentes

2.7. Les cordons de pierres de lave sont des micro-barrages perméables isohypses dont les pierres sont ramassées progressivement dans les champs cultivés. Avec le temps, les sédiments s'accumulent en amont des cordons et la pente du champ diminue en formant des terrasses progressives.

3. Les pratiques de restauration de la productivité des sols.

3.1. La jachère:

Elle consiste à laisser en repos une parcelle pendant un certain temps pour lui permettre la reconstitution naturelle de la structure et le stockage des éléments nutritifs du sol. Quand un champ ne donne plus assez de production, il est laissé au repos au profit d'une autre exploitation qui a bénéficié d'une jachère ou qui est gagnée sur la forêt. La jachère se fait avec une végétation naturelle qu'on laisse pousser à l'endroit où on a récolté une culture ou au milieu d'une culture pérenne (arbres fruitiers) ou semi-pérenne (manioc).

-**La jachère longue** permet de rétablir à la fois un bon état structural du sol, des teneurs suffisantes en matières organiques et la disponibilité en éléments nutritifs pour les cultures. Les champs bénéficiant d'une jachère longue (plus d'une année culturale) servent aussi de pâturage pour le bétail attaché ou libre mais gardé. Dans ces conditions, les déjections animales laissées par le bétail en parcours améliorent la fertilité du sol dans une certaine mesure. L'érosion y est aussi limitée par la végétation à condition qu'il n'y ait pas surpâturage (Photo 11.6).



Photo 11.6 : Jachère longue broutée par des chèvres en liberté.

-**La jachère courte** ne dure qu'une saison. Le terrain est colonisé par une végétation naturelle mélangée à des résidus de culture (restes de maïs, de sorgho...). La jachère est alors utilisée comme pâturage de courte durée et bénéficie des déjections animales. La jachère courte est également faite avec des cultures semi-pérennes, c'est-à-dire celles qui occupent le terrain plus d'une saison culturale et dont la technique de conservation consiste à les laisser dans le sol pendant la durée de leur consommation. Il s'agit notamment du

manioc, de l'igname et de colocases. Dans ce cas, les animaux ne seront pas autorisés à paître sur la parcelle. S'il y a assez de végétation, elle sera coupée et donnée comme fourrage aux animaux au piquet et à l'étable. Le sol sera enrichi principalement par des remontées chimiques et l'érosion est freinée par la végétation qui s'y développe (Photo 11.7).



Photo 11.7 : Jachère courte avec manioc stocké dans le sol en attendant sa consommation.

Avec une croissance démographique galopante et l'augmentation des besoins, la durée de la jachère a progressivement diminué, voire même disparu, avec l'émiettement des exploitations dû aux héritages. Comme toutes les terres cultivables ont déjà été défrichées, il faut maintenant protéger le peu de terre disponible et intensifier sa productivité par tous les moyens.

3.2. L'enfouissement des résidus et déchets :

Pour les agriculteurs qui n'ont pas de bétail, l'enfouissement des résidus de culture et des déchets ménagers (cendres et déchets domestiques) constitue la principale solution pour intensifier la productivité de leur sol. C'est une filière courte (1 à 3 mois) qui permet un recyclage rapide des nutriments contenus dans la biomasse. L'enfouissement a lieu pendant le labour au début de chaque saison culturale.

Il existe diverses méthodes traditionnelles où l'on ramasse les résidus de labour. Après qu'ils aient été séchés au soleil, on les dispose en petits tas que l'on recouvre de terre en forme de butte, où l'on plante ensuite de manioc ou de patate douce. Quelquefois, on y associe des cultures à faible enracinement comme le haricot et le pois cajan. A la récolte ces buttes sont détruites et la terre riche en matière organique est répandue alentour. Des enfouissements répétés dans l'année fournissent des matières organiques fraîches qui 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 (Roose, 1994).

3.3. L'utilisation d'excréments humains :

Pour certains agriculteurs, les déjections humaines sont éparpillées sur la parcelle et sont couvertes d'herbes pour ne pas attirer les mouches et pour garder la chaleur nécessaire à une fermentation rapide ; elles seront enfouies au labour de la saison suivante.

Aussi, dans une bananeraie qui n'est pas régulièrement cultivée, les agriculteurs creusent de petits trous (environ 50 cm de diamètre et 50 cm de profondeur) au milieu d'une rangée de bananiers et les remplissent avec les excréments humains. Une fois pleins, les trous sont bouchés avec de la terre et ils en creusent d'autres un peu plus loin. Au début de la saison des pluies, ils plantent de nouveaux rejets de bananiers dans les vieux trous après avoir mélangé les excréments avec la terre. Ainsi, ils arrivent à rajeunir régulièrement leurs petites plantations de bananiers (Roose et Kouakoua, 2017).

D'autres agriculteurs creusent un trou un peu plus grand (50 cm de diamètre et 100 cm de profondeur) à l'extérieur de l'habitation autour duquel ils construisent une hutte non couverte ; parfois même ils le délimitent avec quelques pieux joints entre eux par des roseaux secs pour signaler sa présence. Le trou est utilisé comme latrine pendant environ 6 à 12 mois en jetant des pailles, de la terre et quelquefois des résidus de labour. Une fois rempli, le trou est rebouché avec de la terre et couvert de paille. Il faut alors attendre au moins 12 mois pour ouvrir le trou et puiser la fumure prête à l'utilisation localisée.

3.4. L'utilisation des cendres :

Les agriculteurs ont longtemps pratiqué l'incinération des résidus de labour parce que la cendre obtenue était censée être riche en éléments minéraux profitables aux cultures. Après qu'ils aient fait sécher les mauvaises herbes et les résidus de culture au soleil, ils les disposaient en petits tas circulaires éparpillés sur la partie la plus pauvre de la parcelle et y mettaient le feu juste avant les premières pluies de la saison. La cendre obtenue était alors mélangée avec le sol au moment du semis.

Quelquefois, quand on a une quantité importante de biomasse après le défrichage d'une parcelle, on préfère la brûler sur place et enfouir la cendre pendant le labour.

Cette pratique permet de remonter le pH et de réduire la toxicité aluminique, mais la productivité du sol reste toujours faible sans autres amendements organiques ou chimiques. Quant à la cendre provenant de la cuisine, elle est souvent mélangée avec les déchets ménagers pour faire le compost, mais elle est parfois utilisée directement pour amender les jardins domestiques.

3.5. Le compostage de la biomasse :

La pratique du compostage a été longtemps utilisée par les paysans les plus pauvres qui ne possèdent pas de bétail. Pour eux, les compostières au champ sont le principal moyen de disposer de fumure organique pour restaurer la fertilité du sol. La biomasse provenant du défrichage et les résidus de labour, quand ils ne sont pas directement brûlés, sont entassés dans un creux au milieu du champ ou à côté de celui-ci pour faire du compost. Plus tard, on y ajoutera les résidus de sarclage. La transformation de la biomasse qui dépend de la nature de celle-ci peut prendre de 6 à 12 mois ; malheureusement, le rendement est très faible (10 à 20 %) quelle que soit la qualité de la biomasse. Ainsi, les champs qui sont amendés de la sorte se dégradent progressivement et deviennent incapables de donner une production suffisante pour subvenir aux besoins élémentaires des paysans. Aujourd'hui, les paysans apprennent à faire un compost amélioré qui est fait d'un mélange de résidus de toute sorte

auxquel on incorpore les cendres de cuisine, les bouses de vache ou le fumier organique et l'urine animale. Le compostage durera trois mois et donnera un fertilisant gratuit et biologique alors que les engrais chimiques sont chers et acidifiants (Fanny, 2010).

Pour les agriculteurs disposant de bétail, le compostage est plus ou moins amélioré, mais demande encore plus de travail. En effet, il faut creuser deux fosses assez larges (environ (4x2x1m) près de l'habitation, couper et transporter la biomasse pour la litière et le fourrage des animaux, ramasser ensuite la litière mélangées avec les déjections animales et les ordures ménagères et les mettre dans la première fosse. Une fois la fosse remplie, les déchets et les déjections animales sont transférés dans la deuxième fosse en prenant soin de les mélanger uniformément et seront bien couverts pour garder la chaleur nécessaire à la fermentation. La compostière doit être couverte, mais quelquefois elle est creusée à l'ombre d'un arbre autochtone (Ficus, Markhamia, Erythrina...) pour entretenir une ambiance fraîche et humide qui favorisait la fermentation et la décomposition rapide du compost.

Chez les agriculteurs disposant d'un nombre important de cheptel ou ceux qui ne peuvent pas faire de compostières, souvent par manque de main-d'œuvre, la litière et les déjections animales sont ramassées et directement déposées au champ et couvertes de paille pour entretenir une certaine chaleur qui va accélérer la décomposition. Les matières organiques étaient ensuite réparties uniformément sur le champ et enfouies pendant le labour sans attendre qu'elles soient complètement décomposées. Ainsi, le paysan sait bien que cette fumure ne profitera pas pleinement à la culture de la première saison, mais que les cultures de la saison suivante pourront en bénéficier (Photo 11.8).



Photo 11.8 : Litière et déjections animales entassées au champ et redistribuées lors du labour.

Notons que cette pratique était souvent utilisée quand l'agriculteur voulait associer des cultures parmi lesquelles il y en a qui ont un cycle végétatif dépassant une saison culturale : par exemple une association incluant le manioc ou certaines variétés de patate douce à très long cycle végétatif et les légumineuses (haricot, soja) et/ou les céréales (maïs, sorgho).

3.6. Le paillage :

Au Rwanda, le paillage constitue toujours la technique la plus répandue et la plus efficace dans les cultures du bananier et du caféier depuis leur introduction dans les années 1930. Ceci est d'autant plus facile que le bananier produit lui-même la biomasse nécessaire à son paillage : les feuilles mortes, troncs de bananiers récoltés ou résidus d'entretien fournissent une masse importante de biomasse utilisée pour le paillage de la bananeraie et du caféier; quelquefois, une partie sert de fourrage pour animaux surtout pendant les mois très secs.



Photo 11.9 : Bananeraie bien paillée.

Là où le paillage est suffisant, la restitution des éléments au sol est évidente de telle sorte que les paysans font certaines cultures dans la bananeraie sans devoir procéder au labour. Par exemple dans l'Est du pays (Kibungo), certains agriculteurs sèment le haricot à la volée ou dans de petits trous dans une bananeraie bien entretenue ; ils ne sarclent pas parce qu'il n'y a pas de mauvaises herbes qui poussent, et ils reviennent seulement pour récolter : la production est importante.

Quand le paillage est épais de quelques cm, non seulement il restaure la fertilité du sol, mais il permet de lutter contre l'érosion du sol. C'est 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 minéralisation de la litière sur le sol est 30 % plus lente que lorsque la matière organique est enfouie par le labour (Roose, 1992).

Le paillage est aussi fait avec des résidus de culture, notamment les fanes de haricot, de soja, de petit pois que l'on utilise pour couvrir les billons après la plantation du manioc ou des ignames dans une association de légumineuses sur des parcelles se trouvant à proximité de l'habitat. Ce type de paillage est très bénéfique parce que, non seulement il maintient plus longtemps une bonne infiltration des eaux en même temps qu'une bonne activité de la mésofaune, mais aussi il apporte au sol des éléments nutritifs ainsi que des matières organiques fraîches qui améliorent sa structure.

3.7. L'agroforesterie

Depuis longtemps, l'agroforesterie est l'une des caractéristiques du paysage rwandais. L'arbre a toujours fait partie du paysage rural. Il fournit du bois de construction et de chauffage, de la biomasse pour le fourrage, le compost, le paillage et le tuteurage du bananier et les cultures grimpantes, des écorces à usages multiples (cordage, médicaments, vêtements traditionnels...) (Ndayizigiye, 1992 ; Rishirumuhirwa, 1992 ; König, 1992).

Traditionnellement, on laisse des arbres et arbustes autochtones se développer sur les exploitations pour leurs qualités médicinales et leur capacité à produire du bois et assez de biomasse à chaque élagage annuel dans le but d'améliorer la productivité des sols.



Photo 11.10 : Agroforesterie traditionnelle avec des arbres à usages multiples

Le *Ficus thininguii* (Umuvumu) est l'arbre autochtone le plus rencontré dans le paysage rwandais. On le trouve sur les enclos et au milieu des champs où il matérialise un ancien emplacement d'une habitation ou une limite de l'exploitation. Ses branches sont régulièrement coupées pour qu'elles ne fassent pas trop d'ombrage aux cultures. La biomasse sert d'engrais vert ou à la fabrication du compost et le bois obtenu est utilisé comme tuteurs pour les cultures grimpantes (haricot volubile, petit pois, igname, maracuja). Une fois l'arbre coupé, le tronc servait à la fabrication des barques, des ruches, des mortiers-pilon, des cuves de fermentation du vin de bananes : l'écorce était utilisée pour faire des vêtements (impuzu) et des cordes pour la construction des maisons des chefs.

Beaucoup d'autres arbres comme *Vernonia amygdalina* (Umubilizi), *Markhamia lutea* (Umusave), *Erythrina abyssinica* (Umuko), *Acacia hockii* (Umunyinya)... sont maintenus dans le paysage pour leurs qualités médicinales en plus de leur bienfait pour les sols.

Des arbustes autochtones sont utilisés dans des haies bordant les grands chemins et séparant les différentes propriétés.

Les espèces souvent rencontrées sont *Dracaena afromontana* (Umuhati), *Tetradnia riparia* (Umuravumba) et *Euphorbia tirocali* (Umuyenzi). Ces haies sont régulièrement taillées, la biomasse produite est retournée au sol comme engrais vert et le bois est utilisé comme tuteurs pour les cultures grimpantes. Notons que là où les haies sont orientées perpendiculairement à la pente, elles permettent aussi de fixer le sol et de lutter contre l'érosion.

Aujourd'hui, un grand nombre d'arbres et arbustes exotiques sont utilisés dans l'agroforesterie. Parmi les arbres, le plus rencontré est le *Grevilea robusta* qui est estimé pour sa croissance rapide et ses usages multiples : il produit une grande quantité de biomasse pour le compost, du bois de chauffe et des tuteurs lors de ses nombreux élagages, et du bois d'œuvre une fois récolté.

Parmi les arbustes, les plus utilisés sont : *Leucaena* et *Calliandra*. Ils ont une croissance rapide et se prêtent aussi à de multiples usages. Utilisés dans les haies antiérosives, ils fournissent une importante biomasse riche en azote (100 à 125 kg/ha/an sur des haies distantes de 10 m) qu'on peut soit enfouir directement dans le sol comme engrais vert, soit appliquer comme paillage ou mettre dans la compostière (Ndayizigiye, 1993). Dispersés sur la parcelle, ces arbustes fournissent aussi une grande quantité de biomasse, mais surtout du bois de chauffe et des tuteurs.

4. Conclusions

L'agriculture au Rwanda reste aujourd'hui la principale source de moyens de subsistance pour une très grande partie de la population. Plus de 82 % des gens vivent en milieu rural. Et pour survivre, ils n'ont que très peu de terre (moins d'un ha par famille) et les techniques modernes (mécanisation, irrigation...) sont quasi inexistantes. A cela, il faut ajouter la diversité du milieu caractérisée par des fortes pentes et des pluies quelquefois agressives. Depuis longtemps, les paysans ont cherché à maîtriser leur environnement pour en tirer plus d'avantages, mais les techniques utilisées n'ont pas suffi pour maintenir un niveau acceptable de productivité des sols face à la croissance de la population et le manque de terres cultivables.

L'intervention des pouvoirs publics a souvent échoué parce qu'ils n'ont pas d'abord cherché à comprendre le fonctionnement du monde rural. Confiant dans les solutions proposées (fossés antiérosifs, terrasses radicales, haies arbustives), ils ont sous-estimé les techniques traditionnelles et surévalué la capacité paysanne pour l'adoption des innovations. Ce qui a, dans la suite, amené certains agriculteurs à se montrer réticents, voire hostiles, envers les réformes agraires (destruction des ouvrages antiérosifs : fossés et haies vives).

Face à ce constat, des études approfondies ont été menées par l'Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda (ISAR) et des ONG impliquées dans le domaine de l'agriculture pour mieux comprendre le fonctionnement de ces différentes techniques traditionnelles et modernes. Les résultats obtenus convergent vers une même recommandation à savoir qu'aucune technique ou méthode culturale n'est en mesure d'appréhender le problème de gestion conservatoire de l'eau et de restauration de la fertilité des sols sur l'ensemble du pays : une combinaison de techniques et méthodes traditionnelles et modernes (en particulier les engrais P, N, K, Ca) est indispensable pour optimiser chaque situation.

Bibliographie

König, D., 1992. L'agriculture écologique agro-forestière. Une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bulletin Réseau Erosion*, IRD Montpellier, n° 12 : 130-139.

König, D., 2017. Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. p.613-624. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie ». Eds. Roose E., IRD Editions, Marseilles, 711p.

-**Meschy, L., 1989.** La colline et le marais. La gestion des bassins versants au Burundi et au Rwanda, *in Etudes rurales*, n° 115, 116 p.

Ndayizigiye F., 1992. Valorisation des haies arbustives dans la lutte contre l'érosion en zone de montagne (Rwanda). *Bull. Réseau Erosion*, IRD Montpellier, 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 de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 230 p.

Ndayizigiye Fr., 2012. « Les techniques traditionnelles de GCES et de restauration de la productivité des sols du Rwanda », p.155-176. In « Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles ». Eds. E. Roose, H. Duchaufour, G. De Noni, Editions IRD Marseille, ISBN : 978-2-7099-1728-5, 723 p.

Ndayizigiye, F., 2017. « Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda », 591- 604. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie ».Eds.E. Roose, IRD Editions Marseille, 711p.

-**Nyamulinda, V., 1989.** Les méthodes autochtones de conservation des sols dans les régions du Ruhengeri. Leur nature et leur mode d'insertion dans la trame actuelle de lutte contre l'érosion. *Bulletin Agricole du Rwanda* n° 1 : 3-15.

Nyamulinda, V., Ndiruwonkanga V., 1992. Lutte antiérosive et stratégies paysannes dans les montagnes du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* , 12:71-82.

Roose E., Ndayizigiye F., Nyamulinda V., Byiringiro E., 1988. La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive pour le Rwanda. *Bull. Agricole du Rwanda*, 21, 4 :264-277.

Roose, E., Ndayizigiye, F., Sekayange, L., Nsengimana, F., 1992. La gestion conservatoire de l'eau et la fertilité des sols (GCES) : une nouvelle stratégie pour l'intensification de la production et la restauration de l'environnement en montagne. *Bulletin Réseau Erosion*, 12 : 140 – 160

Roose E., Ndayizigiye F., Sekayange L., 1993. L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 327-350.

Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

Roose, E., Ndayizigiye, F., 1997. Agroforestry, water and soil fertility management to fight erosion in tropical mountains of Rwanda, *in Soil Technology*, 11 : 109-119.

Roose, E. Duchaufour, H. De Noni, G., 2012. Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. IRD Editions Marseille, 723 p.

Roose, E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens: contribution à l'agroécologie. Ed. IRD Marseille, 711 p.

Roose E., Kouakoua E., 2017. Valorisation des urines humaines et animales pour la fertilisation des sols tropicaux: une revue. In "Restauration de la productivité des sols tropicaux. I RD Editions: 319-328 dans E. Roose, Editions IRD, Marseille, 711 p

Wassmer P., 1981. Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion des sols et de ses conséquences dans le préfecture de Kibuye. Thèse doct 3eme cycle Fac. Strasbourg, 157 p.

Chapitre 12

Efficacité et limites de l'agroforesterie pour restaurer une agriculture intensive et durable au Rwanda

Dieter König, François Ndayizigiye, Eric ROOSE

Problématique

La région des Grands Lacs d'Afrique de l'Est connaît depuis une cinquantaine d'années une phase active de l'érosion parce que la pression démographique pousse les paysans à étendre leurs cultures en altitude sur des pentes toujours plus raides et sur des sols épuisés. De nombreux projets ont tenté de lutter contre l'érosion, mais leur succès fut de courte durée car les processus d'érosion sont multiples, le référentiel technique n'est pas toujours au point, les conditions écologiques sont très variées (altitude de 800 à plus de 3000 m et pluies de 700 à >2000 mm) et les implications foncières, sociologiques, politiques et économiques sont très variées (Tondeur, 1950).

Les résultats de la recherche confirment sur de nombreuses parcelles les risques graves de décapage (0,1 à 3 cm par an) des horizons humifères par l'érosion en nappe et rigoles et par l'érosion aratoire sur les pentes raides (20 à 60 %) des collines cultivées. Il existe cependant des solutions pour stabiliser les versants : le paillage complet, les haies vives créant des terrasses progressives, les terrasses radicales (en gradins) (mais risques de glissement de terrain), et la végétalisation permanente : forêts avec sous-bois et litière, prairie ou vergers avec plantes de couverture. Mais la « conservation des sols pour elle-même » ne satisfait pas les paysans car elle n'augmente pas la productivité de la terre ni du travail (Roose, 1994).

En 1985, une nouvelle série d'essais a été mise en place par des projets à Nyabisindu (PAP), Rubona (ISAR) et Ruhandé (PASI) près de Butare pour vérifier s'il est possible non seulement de stabiliser le sol, mais surtout d'améliorer substantiellement et durablement la production vivrière en introduisant les arbres dans le système de production, et en augmentant les amendements organiques disponibles sur place. Les haies vives d'arbustes de légumineuses réduisent en effet le ruissellement à 2 % et l'érosion à moins de 2 t/ha/an. Les haies produisent 3 à 9 t/ha /an de biomasse fourragère et 2 à 4 t de petit bois pour le feu, qui

jointe aux résidus de culture forme une biomasse équivalente à la litière déposée par la forêt naturelle. Cette biomasse mobilise 80 à 120 kg/ha/an d'azote, 2 à 12 kg de phosphore (sol très carencé) et 20 à 80 kg de K, Ca et Mg selon la richesse du sol. L'agroforesterie peut donc contribuer à stabiliser ces versants raides cultivés, mais, malgré l'apport de biomasse et de 10t de fumier, des compléments d'engrais minéraux restent indispensables si on veut restaurer un niveau acceptable de productivité du sol et du travail, argument nécessaire pour faire accepter l'effort de protection du milieu rural par les paysans. En plus de la gestion des eaux superficielles, il faut mettre au point des systèmes de production assurant les mêmes fonctions que la forêt tropicale : couverture complète du sol pendant toute l'année par la canopée et surtout par le sous-étage et la litière, enracinement profond pour « remonter les nutriments » entraînés par le drainage et libérés par l'altération des roches, entretenir la vie microbienne qui rend assimilable les éléments minéraux libérés et produire une abondante biomasse capable de nourrir le bétail qui la transformera en compost et fumier riches en microbes.

Sélection des espèces forestières en fonction du milieu.

A la station de Nyabisindu (projet PAP), la coopération allemande avait pour objectif de montrer comment valoriser une petite exploitation en combinant la plantation d'arbres (200 *Grevillea robusta*) pour produire le bois d'œuvre pour la menuiserie, les constructions et le chauffage, la plantation de haies d'arbustes légumineux (*Calliandra*, *Leucaena*, *Mucuna*), pour produire le fourrage pour le petit bétail en stabulation et le paillage pour les caféiers, de l'engrais vert et du fumier, en somme une adaptation des systèmes de gestion des oasis. Les cultures (associées et multi-étagées) étaient plantées en lignes sur de gros billons en courbe de niveau pour contrôler l'érosion. Sur une même parcelle on pouvait voir des cultures vivrières (manioc, patates, maïs, haricots, soja, taro, etc), des arbres fruitiers et une canopée légère d'arbres forestiers (Neumann, Pietrowicz, 1985).

A la station de Ruhande près de Butare (projet Pasi), au Sud du plateau Central du Rwanda, à 1700 m d'altitude, la température moyenne est de 20°C et la pluviosité atteint 1200 mm en deux saisons (König, 1992). Les essais sont installés depuis novembre 1985 sur une pente convexe de 18 à 55 % dont les sols ferrallitiques sont pauvres et extrêmement acides (pH de 3,8 à 4,5). Le terrain a été divisé en bandes de 15 m de large séparées par une ligne d'arbres et un fossé antiérosif : 32 espèces d'arbres ont été plantées en novembre 1985. Quatre ans plus tard, des relevés dendrométriques montrent que le *Grevillea robusta*, l'arbre le plus diffusé par les projets, atteint 6,8 m. de haut tandis que le *Cedrela serrata*, le *Maesopsis eminii*, le *Polyscias fulva* dépassent 5 m. Le *Casuarina equisetifolia*, le *Jacaranda mimosifolia* et le *Croton megalocarpus* montrent aussi une bonne croissance. Si en 25 ans, les espèces exotiques *Grevillea* et *Cedrela* (diam. 26 cm) ont eu une bonne croissance initiale, les espèces autochtones *Maesopsis* et *Polyscias* (diamètre 34 cm) sont finalement plus

productives et concurrencent moins les cultures vivrières. La production élevée des arbres garantit une séquestration élevée du carbone, surtout dans le bois. La transformation d'une parcelle agricole en système agroforestier permet la séquestration durable de 10 à 20 t de C à l'hectare dans la biomasse des *Maesopsis* et *Polyscias* ce qui correspond à 35 à 70 t de CO²/ha. Pourtant on n'a pas observé de changement significatif du carbone dans le sol et même une dégradation là où les termites sont nombreux. La valorisation de la biomasse produite par les jachères améliorées par des légumineuses (engrais verts de *Tephrosia vogelii*, *Sesbania sesban*, ou *S. macrantha*, divers *Crotalaria*) n'a pas la capacité de restaurer la productivité des sols dégradés sans l'apport complémentaire de fumure minérale (N, surtout P et chaux) car la reprise des légumineuses étant très lente les pertes par érosion sont très élevées. Le système de culture en couloir est plus prometteur que la jachère améliorée car il comporte une jachère permanente du champ sur 10 à 20 % de la surface, beaucoup plus efficace pour fixer l'azote de l'air et récupérer les nutriments lessivés dans le sol.

Sur les haies vives plantées tous les 5 m, le *Calliandra calothyrsus* produit jusqu'à 24 t/ha/an de biomasse et semble mieux adapté aux sols acides d'altitude que le *Leucaena leucocephala*. Les herbes (*Pennisetum purpureum* et *Setaria splendida*), malgré leur forte croissance initiale, produisent beaucoup moins que les buissons, disparaissent après 4 ou 5 ans et concurrencent durablement la croissance des arbustes. Il faut donc abandonner cette technique de planter d'abord une ligne d'herbes (trop gourmandes en nutriments) et planter directement sur une petite terrasse de 50 cm une ou deux lignes d'arbustes légumineuses où on accumulera les déchets de labour et de cultures, les pierres et quelques légumineuses rampantes.

Mais l'intégration d'arbres et d'arbustes dans les parcelles cultivées n'a pas que des effets positifs : selon l'espèce, la densité, la fréquence de tailles des racines et des branches, apparaissent des effets de concurrence hydrique, de lumière et de nutriments. La réduction de la production du sous-étage cultivé est remarquable sur des distances variables du tronc : 60 cm pour les autochtones *Polyscias* et *Maesopsis*, 1,5 à 2,5 m pour *Cedrela* et *Grevillea*, encore plus pour les *Crotons* et *Cassias* des savanes semi-arides de l'Est du Rwanda ; par contre la concurrence semble nulle sous *Entandophragma excelsum* de la forêt de Nyungwe. Après dix ans d'agroforesterie et d'agriculture écologique (cultures associées, petit élevage, fumier, compost, engrais verts, arbres et haies vives), König a constaté une augmentation du pH (de 4,1 à 4,35) et des éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg) dans le sol superficiel (30 cm), mais une perte de 20 % de l'azote et des matières organiques. Les apports de MO sont donc complètement dégradés par les termites. Pour intensifier la production sur un sol trop appauvri en nutriments, un complément d'engrais minéraux est donc indispensable.

A la station ISAR de Rubona, à 15 km de Butare, le milieu est très semblable. Les haies vives de *Calliandra* sont également plus productives que les haies de *Leucaena leucocephala* et aussi efficaces pour maîtriser l'érosion et le ruissellement.

A la station ISAR de Karama, 1400 m d'altitude, 836 mm de pluviosité moyenne, le ferralsol est peu acide (pH=5,5), bien pourvu en bases mais pauvre en carbone, azote et phosphore assimilable. Cinq espèces ont été testées dans un environnement de savane semi-aride du SE du Rwanda : les haies de *Calliandra calothyrsus*, *Cassia spectabilis*, *Leucaena leucocephala*, *L. diversifolia* et *Sesbania sesban* ont été installées en novembre 1983. Le *Sesbania* n'a pas résisté aux coupes rapprochées. Plantées à 50 cm sur une ligne isohypse tous les 5 m, les haies occupent 20 % du terrain. Les parcelles cultivées (5 x 20m) reçoivent 10t/ha de fumier de parc sur la moitié de leur surface. La remontée annuelle de nutriments par la biomasse foliaire s'élève à 3,2 à 4,8 t/ha/an d'émonde + 2 à 3,5 t/ha bois de feu, soit 72 à 119 kg d'azote, 2-3 kg de phosphore, 47 à 94 kg de calcium, 8 à 19 kg de magnésium et 29 à 60 kg de potassium. Cet apport minéral équivaut à peu près à 10 t de fumier. Le meilleur arbuste est le *Cassia spectabilis* suivi du *Leucaena diversifolia* qui remonte 4,8 t/ha de Matières Organiques, 119 kg de N, 3,2 kg de P, 59 kg de K, 94 kg de Ca et 18,5 kg/an de Mg. Les autres arbustes sont attaqués par les termites. Il est surprenant de noter que le *Cassia* qui ne nodule pas, a fixé 20 kg de N de plus que les *Leucaena* et *Calliandra* : la différence provient des variations de la masse de feuilles produites.

L'enfouissement des émondes a augmenté la production de sorgho et des haricots mais a réduit la production de patates douces à cause de la concurrence des haies plantées tous les 5 m. La réponse du maïs a été médiocre comme à Rubona, à cause des carences du sol en phosphore assimilable.

La troisième année, l'incorporation des émondes et de dix tonnes de fumier a limité la chute de fertilité du sol (sauf en phosphore, K et Mg dont le sol est carencé), mais n'a pas restauré son niveau primitif. On voit bien l'intérêt du système de culture en couloir pour maîtriser le ruissellement et l'érosion, mais aussi les limites de cette pratique pour restaurer la fertilité initiale et améliorer significativement leur productivité. Il devrait pouvoir être amélioré en réduisant la concurrence hydrique, en optimisant le rythme et la hauteur de taille pour chaque espèce et en taillant les racines superficielles (à 50 cm du tronc) pour favoriser l'enracinement profond des arbres.

Maîtrise du ruissellement et de l'érosion par un système agroforestier

A Ruhande, l'érosion et le ruissellement ont été mesurés sur deux témoins et 8 systèmes agroforestiers. (Voir Tableau 12.1).

**Tableau 12.1. Evolution de l'érosion et du ruissellement annuel moyen de 1987 à 2006.
D'après König (2006)**

Traitements	Erosion (t/ha/an)	Ruissellement annuel moyen (%)
T00 : sol nu labouré	557 à 392	18 à 15 %
T0 : culture de manioc	303 à 195	8 à 6
1 : culture + 200 Grevillea	111 à 57	6 à 4
2,3, 4, 7 : idem + haie Calliandra	12 à 2.3	2 à 1,5
5 et 8 : idem + haie Leucaena	5 à 4.2	2 à 1.8
6 : idem + lignes de Setaria	3.2 à 5	1 à 2

Malgré une érosivité des pluies relativement modeste (Rusa= 350), on a observé sur les parcelles nues de 28 % de pente, des pertes en terre énorme (557 à 392 t/ha/an) et 300 à 200 t/ha/an sous culture de manioc traditionnelle non protégée. La plantation de 200 Grevillea (P1) n'a pas suffi à réduire l'érosion à un niveau tolérable. Par contre l'intégration des arbres et des haies vives de légumineuses dans les cultures associées a permis une réduction de l'érosion, des pertes en eau, en carbone et en nutriments à un niveau tolérable (1 à 2 % des valeurs initiales). Grâce au développement rapide des haies, l'érosion a été réduite à moins de 12t/ha/an dès la deuxième année et à <3t/ha dès la 5eme année c.a.d à moins de 1,5 % des pertes observées sur la parcelle témoin cultivée de façon traditionnelle.

A Rubona, la recherche était orientée vers la sélection des systèmes de gestion de l'eau, la conservation des sols et surtout la production optimale.

Au tableau 12.2, on constate que l'érosion dépend beaucoup de l'agressivité des pluies, du traitement et de l'âge des haies rabattues trois fois chaque année (Roose, 2017).

Durant les 4 premières années, l'addition d'une ligne *d'herbes* (Setaria) à une haie de Calliandra a légèrement réduit les risques d'érosion et de ruissellement, mais plus tard, ces herbes auront un impact négatif sur l'environnement, les touffes vont se dégrader et la production des haies va décroître (König, 2017).

Tableau 12.2. Influence des haies vives sur l'érosion, le ruissellement (%) et la production de haricots + maïs + sorgho en kg/ha/an à Rubona (1989 – 1992).

Traitements	Erosion (t/ha/an)	Ruissellement%	Rendement (Kg/ha/an)
Témoin sol nu	486 à 250	7 à 12	-----
Témoin cultivé	270 à 122	6 à 9	1883-1798-3830
C+Haies Leucaena	70 à 1,6	6 à 2	1540-1753-3815
C+Haies Calliandra	36 à 2	6 à 1,7	1323-1705-4152
C+Haies+Cal+Setaria	29 à 1	4 à 1,8	1300-1860-3918

On s'attendait à ce que le ruissellement et l'érosion augmentent avec les campagnes de culture, suite à la dégradation des matières organiques du sol superficiel. En réalité, on constate sur les témoins que l'érosion diminue suite au tassement et l'apparition d'une croûte de battance, tandis que le ruissellement augmente à cause de la croûte, des agrégats instables et de la diminution des matières organiques du sol.

Par contre, l'érosion est voisine la première année après la plantation sur les trois parcelles aménagées avec les haies : c'est un indice de l'homogénéité du sol de ces parcelles. L'érosion diminue très nettement dès la seconde année et ne dépasse plus 1 à 3 t/ha/an dès la 3ème année, c'est-à-dire moins que l'érosion tolérable (1 à 12 t/ha/an) (Roose, 1994).

En ce qui concerne le rendement annuel global (céréales + soja), la production est médiocre dès la première année (13 à 18 quintaux/ha/an). Malgré l'enfouissement de 20 t de fumier avant la 3ème campagne, la production stagne autour de 17 à 18 quintaux et ce n'est qu'en apportant 10 t/ha de fumier + 2,5t de chaux et 300 kg de N17-P17-K17 que les rendements progressent nettement (38 à 41 quintaux, soit de quoi nourrir 16 habitants à l'hectare). Enfin ils permettent de vendre une partie de la récolte pour nourrir les citadins.

Ici aussi, le Calliandra semble mieux adapté aux sols acides de montagne que les Leucaena...Durant les 3 premières années la ligne de graminée jointe au Calliandra a légèrement amélioré la protection du sol. Mais dès la 4ème année, les touffes de graminées ne sont plus efficaces et même retardent la croissance des arbres.

Restauration de la productivité des cultures

A Ruhandé où les chercheurs voulaient montrer qu'il est possible de maintenir durablement, voir d'améliorer la production avec des engrais organiques, König a

constaté que la jachère améliorée plus le fumier et le compost produits sur des sols acides très pauvres ne pouvaient améliorer significativement le rendement des champs sans la correction de l'acidité (apport de 2,5 T de chaux éteinte) et les carences du sol en azote, phosphore et en bases.

A Rubona, Ndayizigiye a démontré qu'il ne suffisait pas de réduire l'érosion et le ruissellement par les haies vives, de recycler toute la biomasse produite (fumier + compost et paillage) pour améliorer la production des petits champs familiaux. Ce n'est qu'avec la maîtrise du ruissellement et de l'érosion et l'apport de 2,5 t/ha de chaux et de 300 kg de N17+P17+K17 et de 10 t de fumier de ferme qu'on arrive à donner aux plantes cultivées en rotation des rendements suffisants pour nourrir la famille et vendre le surplus en ville.

Conclusions

*Suite à ces expérimentations sur 20 ans, et à celles du Burundi, il a été démontré qu'il est possible de réduire le ruissellement et l'érosion sur ces pentes très fortes pourtant cultivées. Pour y arriver il faut respecter six règles de bon sens :

1. définir un mode de gestion des eaux superficielles adapté au climat,
2. restaurer le drainage et l'enracinement profond par un labour ou un paillage,
3. revivifier l'horizon superficiel par l'enfouissement de compost ou de fumier,
4. corriger le ph du sol entre 5 et 7,5 ,
5. nourrir les plantes cultivées en fonction de leurs besoins et des risques de drainage (fertilisation fractionnée),
6. définir un système de culture produisant une biomasse importante couvrant bien le sol (Roose, 2017).

*Malgré un effort particulier pour mobiliser toutes les matières organiques disponibles, il n'a pas été possible de maintenir une production raisonnable de nourriture sans un complément d'engrais minéraux (chaux + NPK) (König, 1993).

*Il est important d'inventer des systèmes de production durable à forte production de biomasse (intérêt des arbres et des haies) pour compenser les pertes de carbone du sol (minéralisation rapide de l'humus en zones tropicales), le paillage des champs cultivés et les couvertures permanentes (forêt, prairie, verger avec plantes de couverture).

Bibliographie

Balasubramanian V., Sekayange L., 1992. Effets de la culture en couloir sur les propriétés du sol et les performances des arbustes et des cultures vivrières dans un environnement de savanes semi-arides du Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 :180-190.

König D., 1992. L'agriculture écologique agroforestière, une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 130 -139.

König D., 2017. Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. Chap. 46 : 613-624. In E. Roose, « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie », IRD Editions, Marseille : 711 pages.

Ndayizigiye Fr., 1993. Effets des haies arbustives (*Calliandra*, *Leucaena*) sur l'érosion, le ruissellement et les rendements (Rwanda). *Bull. Réseau Erosion*, 13 :41-50.

Ndayizigiye Fr., 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. pp. 591-603. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie ». Eds. E Roose, IRD Editions Marseille, 711p.

Neumann I., Pietrowicz, P., 1985. L'agroforesterie à Nyabisindu. Projet PAP, étude 9, 64 p.

Roose E., Ndayizigiye Fr., Sekayangé L., 1993. L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. . *In Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 327-350.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique FAO*, 70 : 420 p.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie. IRD Editions, Marseille, 711 p.

Rutunga V., 1992. Synthèse des connaissances sur la fertilité des terres et la fertilisation des cultures au Rwanda (1960-1990). Kigali, Minagri, projet Pnud/Fao, 122 p.

Tondeur G., 1950. Erosion spécialement au Congo belge. Ministère des Colonies, Bruxelles, 3eme édition, 240 p.

dans les zones de contact entre les collines et les bas-fonds (collines en demi-orange) et même 50 % sur certains massifs.

Le Kirimiro était jadis occupé par des forêts, au contact avec la région du Mugamba située à l'Ouest, et des savanes dans la partie Est. On y rencontre des systèmes culturaux de types « associations à bananeraies ».

La station de Mashitsi, se trouve à 13 km de la ville de Gitega sur l'axe routier vers Ngozi. Le site expérimental a été installé sur une pente de 8%, sur des sols ferrallitiques très acides, à 1650 m d'altitude. La station jouit d'un climat chaud de type Aw3-4 selon la classification de Köppen avec 3 à 4 mois de saison sèche et des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 1100 mm selon les données de la station météorologique de Gitega, située à moins de 10 km à vol d'oiseau (KAYOYA, 1990). Les intensités des précipitations mesurées à la station sont modérées avec des I_{30} moyennes qui se situent entre 5 à 10 mm/h mais peuvent atteindre 50 à 75 mm/h dans 2,6% des averses (RISHIRUMUHIRWA, 1997).

Le bananier dans les systèmes culturaux traditionnels du Burundi

Le bananier constitue la culture pivot dans les différentes régions naturelles du Burundi à l'exception des hautes terres où les conditions de températures et pédoclimatiques sont défavorables. Les principaux systèmes culturaux à base de bananiers rencontrés sont :

- bananeraies traditionnelles très denses comme on en trouve dans les Mirwa ;
- bananiers en associations avec des cultures multi-étagées surtout dans les zones à forte densité de population selon DUCHAUFOR (2017) ;
- bananeraies paillées avec les résidus de culture ou des pailles rapportées ;
- bananiers en fossés isohypses ou en fosses-compostières-poubelles.

Ces systèmes sont illustrés par les photos ci-après.

Photos 13-2 et 3 : Bananeraie très dense (à gauche) et bananeraie paillée associée au Solanum betaceum et quelques pieds de manioc (à droite)



Les bananeraies denses sont notamment rencontrées à Mageyo, dans la région du Mumirwa à une dizaine de km de Bujumbura sur l'axe routier menant vers Gitega.

Photos13- 4. Paillage en bandes à la station de Mashitsi



Le paillis est généralement constitué de résidus du bananier et des cultures associées et rarement de compléments provenant de l'extérieur de la bananeraie elle-même.

Les « fosses-compostières-poubelles » sont creusées pour extraire des matériaux de fabrication de briques adobes. Par la suite, elles sont utilisées comme compostières où on plante finalement un bananier de case, bien fertilisé et à bon rendement. On observe aussi de plus en plus des bananiers plantés dans les fossés isohypses avec l'encouragement des services de vulgarisation.

Les bananiers en associations culturales multi-étagées sont illustrés par la photo 13- 5.

Photo 13-5 : Bananeraie en association avec des cultures multi-étagées (taro, manioc, haricot)



Il n'est pas rare de trouver deux à trois systèmes bananiers dans la même exploitation selon la distance considérée à partir de la zone d'habitation (le rugo) et le niveau de fertilité des parcelles : les bananeraies les plus denses étant les plus proches et les bananeraies en associations avec 3 à 4 autres cultures étant rencontrées au fur et à mesure qu'on s'en éloigne.

4. Résultats de recherches sur le rôle du bananier en GCES

L'étude du rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations à Mashitsi, de son incidence sur le ruissellement et les pertes en terre, a porté sur les systèmes culturaux bananiers représentés par 4 types d'écartements (2x3m, 3x3m, 4x3m et 5x3m) et par le mode

de paillage de la culture (paillis complet, paillis autour des pieds de bananiers, paillage en bandes isohypses). L'étude a ensuite porté sur la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques très acides (comme on en trouve dans la région du Kirimiro) après 3 années de processus érosifs sur des parcelles ayant perdu des quantités de terre plus ou moins importantes.

Les observations et mesures ont porté sur :

1. les pertes en terre et le ruissellement sous différents systèmes culturaux à dominance bananière (écartements) et sous différents modes de paillis ;
2. la restauration de la fertilité des terres érodées.

Les résultats obtenus ont permis de proposer des modes de conduite des exploitations agricoles basés sur l'optimisation de la production et d'affectation de la biomasse pour une productivité accrue des terres. Les résultats sont résumés ci-après.

4.1. Les risques d'érosion

Les risques d'érosions des différentes régions naturelles du Burundi ont été calculés sur base des différents indices d'érosion : érosivité, érodibilité, indices des pentes et indice cultural du couvert végétal (RISHIRUMUHIRWA, 1997). On s'est aussi basé sur les résultats de l'ISABU (1992) et de ROOSE (1977) pour l'Afrique de l'Ouest.

Les estimations faites ont montré que les risques d'érosion des différentes régions naturelles dépendent des climats, des sols et des pentes mais également des systèmes culturaux. Sous cultures traditionnelles non paillées, ces risques peuvent atteindre 34,7 t/ha/an en plaines, 134,8 t/ha/an dans les dépressions du Nord, 386,4 t/ha/an sur les plateaux, 997,6 t/ha/an sur les fortes pentes du Mumirwa et plus de 1000 t/ha/an sur la crête Congo-Nil. La végétation naturelle réduit ces risques de 1000 fois sous forêts et de 100 fois sous savanes.

4.2. Ruissellement

Les hauteurs d'eau tombée au cours des 3 années de mesures (1989-1991) ont totalisé 3.326,4 mm, soit une moyenne de 1.108,8 mm par an. On a calculé pour chaque précipitation le coefficient de ruissellement (Kr) et on en a déduit le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram) et le coefficient de ruissellement maximal observé au cours de la plus forte averse (Krm_{max}). Les résultats obtenus pour les différents traitements sont présentés dans le tableau 13-1 ci-après.

Tableau 13.1 : Coefficients de ruissellement maximal en 24 heures (Krm_{max}) et moyen annuel (Kram) sous bananeraie suivant les modes de paillis et les écartements à la station de Mashitsi

	Mode			
	Paillis en couronnes		Paillis en bandes	
Ecartements	Krm _{max}	Kram	Krm _{max}	Kram
2 m * 3 m	32,3	4,8	5,3	2,1
3 m * 3 m	32,7	5,6	10,1	2,5
5 m * 3 m	43,5	6,2	18,5	4,0

Ces résultats montrent que le ruissellement le plus élevé pour une seule averse (Krm_{max}) reste élevé pour le paillage en couronnes (plus de 32% pour tous les traitements) mais tombe en dessous de 18,5% sous paillis

en bandes pour tous les écartements. Le ruissellement moyen annuel (Kram) reste modéré pour tous les modes de paillage (moins de 6,2% pour le paillage en couronne et 2,1 à 4,0% pour le paillage en bandes).

Dans les mêmes conditions, le K_{rmax} de la parcelle nue atteint 76,5% et son Kram varie de 18 à 23,8 % suivant les années. Le ruissellement est bien maîtrisé sous paillage complet (K_{rmax} de 1% et Kram de 0,7%). Ceci est confirmé par les résultats obtenus par l'ISABU (1991).

4.3. Pertes en terre

Les pertes en terre (t/ha/3 ans) cumulées en 3 années de mesures sur les différents traitements sont présentées dans le tableau 13- 2.

Tableau 13.2 : Pertes en terre (t/ha/3 ans) cumulées sous bananeraies à la station de Mashitsi après 3 années de mesures suivant les écartements et le mode de paillis

Traitement	Pertes			
	Année 1	Paillis en couronnes	Paillis en bandes	Cumulées (3 ans)
Paillis complet	0,05	0,03	0,06	0,14
2 m * 3 m	2,5	13,9	1,1	17,5
3 m * 3 m	4,4	25,4	2,4	32,2
4 m * 3 m	5,6	36,4	3,7	45,7
5 m * 3 m	7,6	47,7	2,5	57,8
Parcelle nue	40,1	73,3	40,5	153,9

Ces résultats montrent que les pertes en terre sous paillis en bandes sont, en général, de l'ordre de 10 à 20 fois inférieures aux pertes observées sous paillage en couronne. Le paillis complet ramène l'érosion à quelques 30 à 60 kg/ha/an, ce qui est négligeable. La parcelle nue, par contre, enregistre des pertes en terre nettement supérieures (154 t/ha/3ans).

Il ressort de ces résultats que le paillis complet est de loin la meilleure technique de gestion du ruissellement et de réduction des pertes en terre, suivi du paillage en bande. Dans les conditions de Mashitsi, ces deux modes de paillage permettent de réduire de manière significative l'érosion en dessous du seuil de tolérance estimé à 12,7 t/ha/an.

Le paillis complet était obtenu par apport d'*Hyparhenia* appliqué à chaque saison culturale de manière à garder une épaisseur de 7 cm recommandées par les services de vulgarisation.

4. Restauration des terres érodées

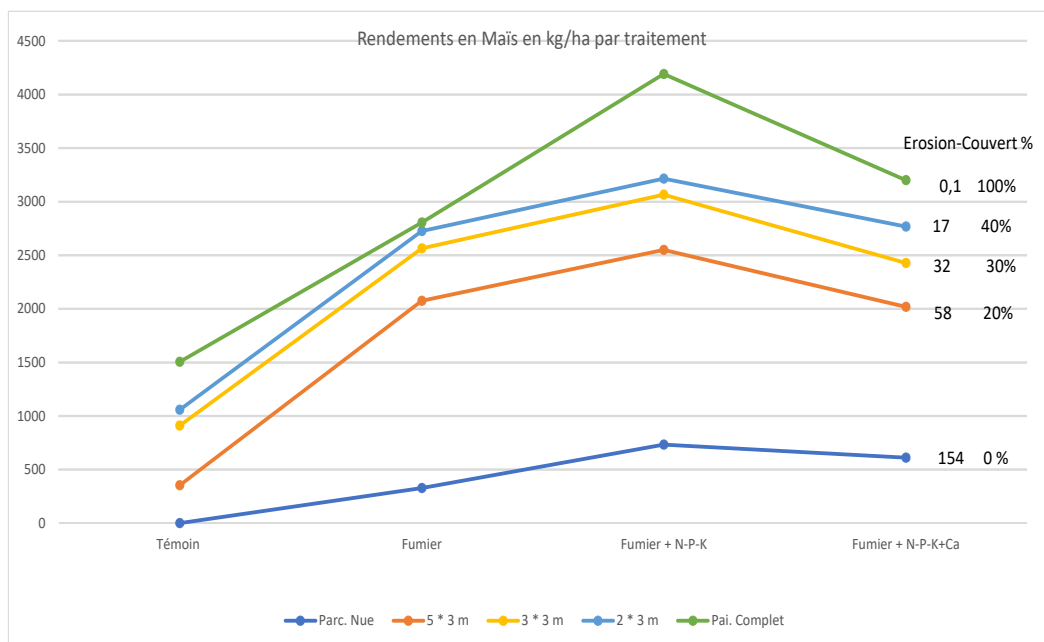
Cet essai a porté sur la réponse du maïs à trois techniques de restauration après 3 années de processus érosif sous les 6 traitements (tableau 2).

Trois techniques de restauration ont été adaptées, à savoir :

3. L'apport de fumier de ferme (10 T de MS/ha/an)
4. L'apport de fumier + N-P-K (60-60-40) ;
5. L'apport de fumier, d'engrais N-P-K et de chaux (500 kg/ha de dolomie).

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 13. 3 ci-après.

Figure 13.3: Réponse du maïs à trois techniques de restauration des terres après 3 années de processus érosifs d'intensité variable à la station de Mashitsi



Ces résultats montrent :

1/ l'impact de l'érosion cumulée sur le rendement en maïs grain

2/ que les sols bien conservés (paillis complet) répondent très bien aux techniques de restauration. Il est par contre difficile d'améliorer la fertilité des terres très érodées (parcelle nue) même à coup de forte intensification (fumier + NPK et dolomie).

3/ l'effet négatif du chaulage avait déjà été observé dans les essais antérieurs de fertilisation à la même station, sur haricot, maïs et manioc. Il serait lié à l'immobilisation de certains oligo-éléments et à la sélectivité de l'échange cationique suite à l'excès de Ca et Mg au détriment du potassium (HOMES et VAN SCHOOR, 1963).

Les études économiques (rapport coût des intrants/valeur du surplus de production ou V/C) ont montré que le fumier est très rentable, suivi du fumier avec engrais N-P-K et beaucoup moins du fumier avec N-P-K et dolomie. Les doses de fumier étudiées sont celles accessibles aux paysans pratiquant l'élevage en stabulation. Des doses supérieures de fumier produisent des effets encore plus intéressants. Cela a été mis en évidence dans d'autres essais à la même station.

L'accès aux engrais N-P-K est facilité par la politique de subvention mis en place par le Gouvernement depuis 2015 avec l'appui des Pays-Bas. Une usine d'engrais (FOMI¹) a aussi vu le jour et distribue des engrais depuis 2019. Quant à la dolomie, elle provient essentiellement du Moso mais son prix reste très élevé.

1

¹ FOMI : Fertilisation organique et minérale industrielle

4.5. Production de biomasse

Les résultats des enquêtes de typologie des exploitations et des rendements agricoles des environs de Mashitsi (RISHIRUMUHIRWA, 1997) ont permis d'établir le tableau ci-après.

Tableau 13.3 : Production de biomasse au sein d'une exploitation moyenne du Kirimiro (Mutobo)

Culture	Surface (ares)	Production (kg)	Résidus (kg)
Banane	27,7	3313	1841
Maïs	34,2	298	426
Haricot	41,1	349	113
Bois (<i>Eucalyptus, Grevillea, Calliandra,</i>	21,9	657	657
Formations herbeuses (<i>Trypsacum, Pennisetum</i>)	21,9	219	219
Total	107,8	3960	3256

Ce tableau confirme le rôle primordial du bananier comme principal pourvoyeur de biomasse dans l'exploitation. Une partie de ses résidus est utilisée pour le paillage des caféières mais aussi pour l'auto-paillage avec stipes de faux troncs et feuilles laissés dans les plantations après récolte des fruits. Ils servent aussi de fourrage et sont utilisés pour la fabrication du compost.

Les productions de ce tableau sont celles observées dans les systèmes traditionnels, peu productifs et à faibles intrants. Le recours aux méthodes modernes d'intensification (variétés à hauts rendements, fertilisation et gestion de l'eau) peut multiplier ces rendements par 3 ou 4 portant ainsi la production des résidus à plus de 10 tonnes/ha/an.

Ceci a été confirmé par les essais sur les techniques de fertilisation des sols ferrallitiques du Kirimiro (RISHIRUMUHIRWA, 1992). Ils ont montré tout l'intérêt du fumier dans la gestion de la productivité des terres et ont mis en évidence que l'optimisation de la production de biomasse repose d'abord par les bonnes techniques de fertilisation.

La diversification des sources de biomasse implique l'intégration des arbres et des haies vives dans l'exploitation. Le potentiel de production de ces arbres et haies a été étudié notamment par le Projet Agropastoral de Nyabisindu au Rwanda (NEUMANN et PIETROWITZ, 1989). Ils ont notamment montré que le *Grevillea robusta* pouvait produire 0,12 m³ de grume/arbre/an, 45 kg de branchages et 33 kg de feuilles. Selon la même source, les arbustes (*Leucaena* et *Calliandra*) peuvent produire 200 à 300 kg/an/100 m linéaires et les graminées (*Setaria, Pennisetum*) de 100 à 444 kg/an/m linéaire.

De ce qui précède, l'approche d'optimisation de production de biomasse dans les exploitations traditionnelles reposera donc sur les 4 piliers principaux suivants : le bananier, l'intensification agricole par les différentes techniques de fertilisation, l'introduction des haies vives mixtes, de l'agroforesterie et la promotion de l'élevage en stabulation.

La biomasse produite devra être affectée de la manière la plus judicieuse possible pour répondre aux besoins des ménages en matériel de paillage, en fourrage et litière, bois de feu et d'œuvre.

Une tentative de simulation d'optimisation des productions de biomasse a été faite sur base des données du tableau 3 et des productions d'arbres et haies sur une exploitation d'un ha. Les cas suivants ont été envisagés :

6. Production de biomasse des exploitations traditionnelles :
7. Exploitations avec diversification moyenne (125 arbres/ha) avec ou sans fumier et N-P-K ;
8. Exploitations avec forte diversification (250 arbres/ha) avec ou sans fumier et N-P-K.

Les doses des intrants retenues pour l'intensification sont : 10 T de M.S. pour le fumier et 60-60-40 unités fertilisantes pour le N-P-K. Les résultats de la simulation sont donnés le tableau 13- 4.

Tableau 13.4 : Bilans bio-massiques des différents systèmes culturaux d'une exploitation d'1 ha dans la région du Kirimiro en kg de matière sèche

Système exploitation	Rés. agri	Feuilles arbres	Total feuilles	Bilan paillis	Couvert. sol %	Branchage	Grumes	Total bois	Bilan combust.
Traditionnel	187 9	738	2617	-2383	0	1113	1322	2435	-4565
Diversifié (1)	187 9	446	6325	+1325	18	3895	4626	8521	+1522
Diversifié (2)	187 9	6150	8029	+3029	43	6677	7930	14607	+7607
Diversifié/intensifié (1)	491 3	446	9359	+4359	62	3895	4626	8521	+1522
Diversifié/intensifié (2)	491 3	6150	11063	+6063	85	6677	7930	14607	+7607
Diversifié (1) = 125 arbres/ha (<i>Grevillea</i>) + 1000 m/ha de haie mixte (<i>Leucaena</i> + <i>Pennisetum</i>) Diversifié (2) = 250 arbres/ha (<i>Grevillea</i>) + 1000 m/ha de haie mixte (<i>Leucaena</i> + <i>Pennisetum</i>) (Besoins en fourrages estimés à 1840 kg de M.S. pour les 0,61 UBT rencontrés dans exploitations de 50 ares)									

Il ressort de cette simulation que le système traditionnel à faibles intrants et sans diversification reste déficitaire en paillis et en bois de feu. Les autres systèmes parviennent à couvrir les besoins en litières (feuilles), en paillis et en combustible.

La diversification par plantation d'arbres est très courante en milieu rural et empiriquement pratiquées dans les exploitations traditionnelles. Elle a toutes les chances d'être adoptée par les agriculteurs pour autant que les services de vulgarisation, la recherche et les projets de développement en fassent une politique de gestion et conservation des sols et de la productivité des terres. L'optimisation de la production des résidus ira de pair avec l'accroissement de la production agricole par les différentes techniques de fertilisation incluant la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses des haies vives et la remontée des nutriments par l'action racinaire des arbres et arbustes au sein de l'exploitation. En effet, plusieurs auteurs ont montré que la conservation du sol n'a d'intérêt pour le paysan que s'il se traduit par une augmentation de la production (ROOSE, 1994).

Dans le même ordre d'idées, la promotion de l'agroforesterie dans ces petites exploitations devra inclure des fruitiers pour contribuer aussi à la sécurité alimentaire des ménages qui comptent en moyenne de 7 à 10 personnes.

4.6. Gestion optimisée des résidus et contrôle de l'érosion

La logique de la gestion optimisée des résidus part de la maximisation de leur production (et des récoltes) en combinant au mieux les techniques d'intensification et de diversification. Les résidus produits sont ensuite répartis au regard des différents besoins des ménages (fourrage et bois de feu). Le surplus est affecté au paillage des cultures.

Les recherches menées à Mashitsi dans la région du Kirimiro ont permis de modéliser l'efficacité du paillis dans la réduction des pertes en terre en fonction de son taux de couverture du sol (RISHIRUMUHIRWA, 1997). Le tableau 4 permet de transformer les bilans paillis en % du sol qu'on peut couvrir avec ces excès

de résidus, on en déduit les pertes en terres et on vérifie si ces dernières sont ou pas en dessous du seuil de tolérance (12,7 t/ha/an selon USLE et 2,5 t/ha/an pour les sols très pauvres des zones tropicales humides).

Le tableau 4 montre que, dans les exploitations traditionnelles, on n'arrive pas à réduire l'érosion sous le seuil de tolérance sans intensification et diversification. Le système n'est performant qu'avec une forte densité d'arbres (250/ha) combinée avec de bonnes techniques de fertilisation. On note également qu'à quantités égales de résidus, le paillis en bandes est nettement plus efficace que le paillis en couronne.

5. Conclusions

Le bananier est la principale culture des systèmes culturaux dans la plupart des régions naturelles du Burundi. Son importance économique et sociale est bien connue. Il joue aussi un rôle important en conservation des sols grâce à sa forte production de biomasse. Les recherches menées à l'ISABU et surtout à l'IRAZ l'ont clairement mis en évidence. Elles confirment l'efficacité des connaissances intuitives des agriculteurs dans leur conduite des bananeraies (gestion des stipes et feuilles comme paillis, et associations avec d'autres cultures (couverture permanente du sol). Ceci est notamment constaté dans les plantations de Mageyo.

Toute atteinte à cette culture, comme l'apparition du BXW (*Banana Xanthomas Wilt*) qui a décimé des plantations dans cette région en 2010, conduit à une crise érosive majeure comme cela a été mis en évidence par une étude récente à Cashi sur la route Bujumbura – Rumonge (NIZIGAMA, 2017). La disparition du bananier des suites du BXW a conduit au décapage des horizons de surface (30 cm) en moins de 7 ans.

Mais, le bananier seul ne suffit pas à couvrir tous les besoins des fermes et ménages en aliment pour bétail et en combustible tout en assurant la protection des sols par le paillage des cultures. Néanmoins, le rôle du bananier devra être appuyé par une approche globale tenant en compte des autres éléments des systèmes culturaux (arbres et haies mixtes) et des approches basées sur la diversification par les arbres et les haies mixtes, mais aussi l'optimisation de la production de biomasse par le fumier et les engrais N-P-K. Cette dernière passe par la promotion de l'élevage en stabulation plus productif en fumier de ferme. En effet, il a été démontré que ce mode d'élevage peut de produire 12,5 t/an de fumier/UBT (POZY, 1989) contre à peine 600 kg pour une vache sur parcours d'après ROOSE (1994).

L'approche proposée est d'affecter prioritairement la biomasse produite au fourrage et à la litière. Le surplus sera ensuite utilisé pour pailler les cultures en adoptant un paillis le plus uniforme possible sur l'ensemble des champs. Les branchages et autres ligneux serviront de combustibles. Les grumes des arbres pourront fournir du bois d'œuvre et de construction.

L'intégration de ces recommandations dans les politiques agricoles viendra renforcer les bonnes pratiques paysannes rencontrées dans les champs bananiers et aidera à rendre les agriculteurs plus performants en conservation des sols pour une gestion durable de leurs exploitations.

6. BIBLIOGRAPHIE

DUCHAUFOR H., 2017. La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central), in « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie », p. 81-90. Editions IRD,

Montpellier

- HOMES, M.V. et VAN SCHOOR, G.H., 1963. La nutrition minérale des végétaux. Masson et Cie, Paris
- ISABU, 1991. Bilan de 10 ans de recherches sur l'érosion et le ruissellement sur parcelles expérimentales et bassins versants au BURUNDI. Rapport Érosion PRPE- 85 pages
- KAYOYA, P., 1990. « Evaluation de l'indice d'agressivité climatique de l'équation de Wischmeier sur le plateau central du Burundi : Région du Kirimiro. » Mémoire ISA, Université du Burundi.
- MINAGRIE, 2016. Protocole pour la lutte antiérosive au Burundi et son plan d'action 2016, 10 p.
- MINATE, 2011. Stratégie Nationale et plan d'action de lutte contre la dégradation des sols 2011-2016, 90 p.
- NEUMANN, I. et PIERTOWICZ, P., 1985. L'agroforesterie à Nyabisindu. Etudes et expériences. Note technique n° 9 PAP.
- NIZIGAMA, C., 2017. Rôle du bananier dans la conservation des sols : cas de la colline Cashi en Commune Bugarama, Province Rumonge, 71 p.
- POZY, P., 1989. L'atelier Bututsi. ISABU, Bujumbura.
- RISHIRUMUHIRWA, T., 1992. Ruissellement et érosion sous bananier au Burundi. *Bul. Rés. Erosion* n°12, IRD Montpellier, : 83-93.
- RISHIRUMUHIRWA, T., 1993. Potentiel du bananier dans la gestion et la conservation des sols ferrallitiques du Burundi. *Cahiers ORSTOM Pédologie*, 28, 2, Paris, : 367-383.
- RISHIRUMUHIRWA, T., 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique de l'Est (Application au cas de la région du Kirimiro-Burundi), 223 p. + annexes.
- ROOSE, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt ans de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, Paris, 108 p.
- ROOSE, E., 1994. Introduction à la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédologique FAO* n° 70, 470 p.
- ROOSE, E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens: contribution à l'agroécologie. Editions IRD, Montpellier, 711 p.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning -. USDA Agriculture handbook n° 537, 58 p.

Chapitre 14

Gestion conservatoire des sols en pays Bamiléké

Stratégies traditionnelles

en montagne densément peuplée

S. Valet, J.M. Fotsing, Z. Boli, E. Roose

Problématique

Situé en Afrique centrale entre le 5 et le 8° de latitude Nord, l'Ouest Cameroun forme un complexe de hauts plateaux et de montagnes s'échelonnant entre 700 et 3100 m d'altitude. Il est constitué de plusieurs formations géomorphologiques sous des climats variés souvent très contrastés et d'une grande diversité d'écosystèmes naturels ou anthropisés.

Malgré des pluies abondantes et une forte densité de population, atteignant localement plus de 600 hab/km², les techniques traditionnelles d'exploitation des terres s'avèrent relativement efficaces pour préserver leur fertilité et les protéger de l'érosion. Ce qui frappe c'est l'importance des surfaces cultivées sur fortes pentes, enserrées dans un bocage en pays Bamiléké (sur terres volcaniques riches) et en milieu plus ouvert en pays Bamoun (sur terres granitiques plus pauvres) (Valet, 1985). Cependant, les transformations en cours depuis 1950 ont abouti d'une part à l'introduction des caféiers, de la monoculture mécanisée et des engrais chimiques, à la multiplication des habitations secondaires, à la simplification des aménagements et par ailleurs à l'extension des cultures sur les pentes fortes jadis réservées aux pâturages et à l'élevage de moutons et de chèvres. Suite à ces évolutions, les pluies même peu agressives ont tendance à ruisseler et à menacer les terres cultivées en aval. Face à ces conditions difficiles, les populations ont développé un savoir-faire pour s'adapter aux changements imposés et atténuer les effets néfastes sur leur production. Dès lors comment imaginer une montagne densément peuplée, productive et stable? La réussite mitigée du Projet de Développement rural de la Province de l'Ouest qui proposait le creusement de fossés antiérosifs, le terrassement en gradins et la fertilisation minérale nous amène à envisager des solutions inspirées des savoir-faire locaux dans ce milieu aux potentialités agricoles élevées.

Des milieux relativement fragiles

Le pays bamiléké se compose de quatre unités orographiques :

*Entre 700 et 1100 m, les plaines périphériques (Noun et Mbo) occupent 20 % du pays avec quelques collines en pentes douces ;

*Entre 1100 et 1600 m, le plateau granito-gneissique du sud, avec des demi-oranges où peuvent affleurer des boules de granite ;

*Vers le Nord, le plateau basaltique, avec des croupes surbaissées séparées par des vallées étroites : les pentes de 12 à plus de 25 % y dominent ;

*Au-dessus de 1600 m, les montagnes (<15% du territoire) ; 75% des versants ont des pentes de plus de 25 %. Au sud on trouve quelques massifs granitiques et au Nord-Ouest, la chaîne volcanique des Bamboutos qui culmine vers 2740 m.

Les sols se classent en quatre groupes (Segalen, 1967) :

*les sols ferrallitiques rouges et jaunes sur basalte ancien et sur granites enrichis en cendres : ils sont riches, très poreux et perméables ;

*les sols ferrallitiques plus sableux sur granites/gneiss sont moins riches, plus fragiles et plus sujets à la battance des pluies ;

*les andosols venant sur des roches volcaniques meubles basiques sont très perméables et riches en matières organiques, azote et bases ;

*les sols hydromorphes, sableux sur granite, tourbeux sur basalte et alluvions, occupent les bas-fonds marécageux. Peu fertiles mais plats et riches en matières organiques, ils font de bonnes terres agricoles.

Les propriétés de ces sols sont très variables : pH de 5,2 à 6,5 ; la MO de 2,4 à 13,4 %, l'azote de 0,1 à 0,6 %, la somme des bases échangeables de 1,8 à 31,5 méq./100g., le phosphore assimilable de 0,3 à 4,11 %. La texture est argileuse (10 à 70%), à sablo-limoneuse (30 à 10 %). Ils sont plus épais et plus fertiles sur les bas de versants que sur les sommets.

Le climat est tropical d'altitude. Les pluies de Mousson diminuent de 2500 mm/an du SO, à 1460 mm au NE., et les intensités horaires sont faibles (entre 15 et 40 mm/heure). Les températures moyennes diminuent de 24°C dans les plaines vers 600 m, à 16°C vers 1800 m d'altitude. Sauf en haute altitude, l'ensoleillement assure une température de 20 à 30°C dans le sol et une bonne minéralisation des M.O.

Une pression démographique forte sur terres volcaniques. Le pays Bamiléké est une région d'occupation humaine ancienne et de densité élevée de 200 à plus de 1000 hab/km² dans certains secteurs. Elle dépasse rarement 150 hab/km² dans les zones montagneuses granitiques et alluviales. L'habitat est dispersé et le système d'héritage lègue tout le patrimoine foncier à un unique héritier mâle. Les autres fils

doivent trouver ailleurs des terres pour s'installer ou un commerce pour vivre en ville. Avec le taux de croissance annuel de 3,2 %, la pression foncière ne cesse de croître malgré l'exode massif vers les villes.

Des techniques traditionnelles efficaces

Des systèmes traditionnels intensifs sur les plateaux habités :

Sur les exploitations familiales (< 3 ha) disposant des trois terroirs indispensables à l'autonomie (bas-fond, versant et sommet de colline), on pratique une polyculture associée au petit élevage (moutons, chèvres, porcs, volailles) dans un paysage de bocage. Les parties supérieures des collines portent soit des pâturages à *Pennisetum purpureum* et *Panicum maximum* en altitude, soit des champs vivriers temporaires où l'arachide est associée au maïs, la patate douce, les haricots, les ignames associées aux pois de terre pour les basses altitudes.

Les versants sont le domaine de l'habitat et des jardins multi-étagés. Autour des habitations et de l'enclos aux cochons, à l'abri des caféiers, des arbres fruitiers et forestiers (120 arbres /ha) prospèrent des vivriers divers mélangés en fonction de la richesse du sol : maïs, taro, ignames, légumes, bananiers, macabos, manioc et arachides et condiments. Une deuxième campagne de cultures (haricots, patates et pommes de terre) succède à la récolte du maïs.

Les bas-fonds sont réservés aux palmiers *Raphia farinifera* et à quelques champs de tubercules associés à des bananiers et légumes divers.

Des associations complexes d'arbres et de cultures diverses.

Ces associations généralement « disposées en vrac » prennent en compte les qualités des sols, les paysages géologiques et les besoins familiaux et socio-économiques (proximité des marchés). L'alimentation de base est constituée de maïs, macabos et vignats, plus des compléments de patates et pommes de terre. La densité équivalente (DER) varie de 1 à 2.9 en pays Bamiléké et 1.4 à 1.7 en pays Bamoun et jusqu'à 3,3 si on compte les arbres. Les paysans augmentent la densité des cultures avec la fertilité actuelle du sol (en fonction du taux de M.O. ou des bases échangeables). Le nombre de cultures et leur densité conditionnent la couverture du sol : les sols les plus pauvres sont donc moins bien protégés contre l'érosion. La surface relative nécessaire à la production de la culture pure pour produire les récoltes des cultures associées (LER = Land Equivalent Ratio) varie de moins de 1 à 3. (Valet, 1999, 2013). Ceci permet une occupation plus efficace de l'espace là où la pression foncière est forte. Dupriez (1980) estime que la compétition entre les plantes associées est réduite car les « assiettes radiculaires » sont diverses et complémentaires : elles maintiennent mieux le sol en place. De plus, le décalage des semis et la longueur des différents cycles déplacent les besoins nutritionnels et hydriques à différentes époques. L'étagement racinaire entre igname et maïs diminue leur concurrence. Le calcul des bénéfices financiers comparés entre

monocultures mécanisées et culture associée sur gros billons manuels montre un bénéfice croissant de 5000 à 55000 CFA (1970) si les cultures associées sont au nombre de 2 à 12 (Valet et Osier-Lafontaine, 2013).

Le bilan hydrique, calculé sur 57 essais entre 1965 et 1972 sur différents sols, montre que les rendements sont proportionnels à l'évapotranspiration jusqu'à ce qu'on observe un drainage sous racinaire de 200 mm. Si le drainage dépasse 200 à 400 mm, le rendement baisse fortement. Or l'association de 2 à 12 cultures plus les arbres augmente forcément l'évapotranspiration et donc les rendements de la biomasse. (Valet et al., 2013).

Les techniques de maintien de la fertilité des sols.

La jachère courte d'intersaison est fréquente sur les champs vivriers, tandis qu'elle peut durer une ou plusieurs années après les cultures d'arachide au sommet des collines de basse altitude. La jachère semée en *Stylosanthes* apporte une forte biomasse de fourrage et enrichit le sol en azote.

L'intégration de l'élevage à la culture. Les moutons et les chèvres pâturent les jachères et les résidus des cultures et y laissent leurs déjections. L'enclos à porcs, très riche en M.O. est régulièrement déplacé autour des habitations et mis en culture. Le fumier ramassé dans les enclos (volailles, porcs, chèvres) est disposé dans les sillons des champs. Sur les hautes terres de parcours, des pasteurs Mbororos semi sédentarisés pratiquent un élevage de bovins et ovins. Autours des campements, certains éleveurs pratiquent une agriculture intensive pour valoriser le fumier des aires de stationnement nocturne du bétail (Fotsing, 1994).

L'enfouissement des matières organiques sous les billons. Le fumier, les résidus organiques des récoltes et des cuisines, ainsi que les cendres sont entreposées dans les sillons, puis recouverts de terre lors de la préparation des champs. S'ils ne sont pas entièrement humifiés, les déchets sont exposés en surface lors du labour suivant et protègent partiellement la surface des billons. Le recyclage de la biomasse est très efficace car sillons et billons recevront chacun à leur tour les déchets domestiques et le produit des sarclages.

L'écobuage. Au défrichage, les herbes arrachées sur les parcelles sont séchées en tas, recouvertes de terre, puis mises à feu. Leur combustion lente permet de conserver les cendres à l'abri des pluies et d'améliorer le pH du sol. Sur les grosses buttes des sols hydromorphes, l'écobuage libère brutalement beaucoup de phosphore assimilable et de potasse. Il augmente la production de maïs grain de 79 % si on apporte 200 kg de N/ha et de 31 % de macabo sans apport d'engrais. (Seguy, 1971 ; Valet et al., 2013).

Les bois raméaux fragmentés (BRF). Ils fournissent du carbone stable (lignine) et des nutriments, des sucres, des protéines et de la cellulose. Ils présentent les avantages

d'un mulch très efficace en zone semi-aride (pays Bamoun) pour limiter le ruissellement et l'érosion.

Les techniques de conservation des sols.

L'association des arbres aux cultures. Les arbres marquent les limites des terroirs, fournissent l'ombrage nécessaire à certaines cultures, réduisent la vitesse du vent au sol, remontent les nutriments en surface et surtout fournissent une litière qui protège très efficacement le sol de la battance des pluies. Les racines profondes des arbres réduisent les risques de glissement de terrain (Roose, 1994).

Le quadrillage des champs par les haies vives (Fotsing, 1994). Il s'agit de haies juridiques qui limitent la propriété et la défendent contre le bétail qui circule entre l'habitat et les pâturages communs des sommets des hautes collines. Les haies enclos partagent les champs en parcelles à vocations diverses. Elles freinent les eaux de ruissellement et piègent les particules érodées si elles sont posées horizontalement et renforcées de raphias. Elles représentent une source importante de bois de feu, de tuteurs pour certaines cultures et de fourrage pour le petit bétail. Elles sont constituées d'essences à croissance rapide et reproductibles par bouturage : *Ficus sp.*, *Markhamia lutea*, *Polyscias fulva*, *Harungana madagascarensis*, *Podocarpus milanjanus*, *Dracaena arborea*, *Hymenodycton floribundum*, *Datura stramonium*, *Vernonia sp.*, etc).

L'association de plusieurs cultures sur le même gros billon. Elle assure la stabilité des billons et une bonne couverture pérenne qui amortit l'énergie des pluies. Elle réduit l'érosion ainsi que les attaques des insectes et maladies.

Le maintien des résidus de récolte sur les champs : les tiges de maïs sur pied, les fanes d'arachide et les adventices laissées dans les sillons assurent un léger paillage au sol qui ralentit le ruissellement et freine l'érosion hydrique et éolienne.

La taille et l'orientation des billons sur les parcelles cultivées :

Sur les pentes faibles (<12 %), des petits billons mécanisés sont disposés parallèlement aux courbes de niveau. Sur les sols granitiques moins perméables, on élève des cloisons tous les 5 m.

Sur les pentes fortes (25 à 50 %) des régions volcaniques, les femmes construisent de gros billons en recouvrant les MO accumulées sur les anciens sillons par la terre arrachée aux anciens billons : ainsi elles accumulent plus de terre aérée et perméable sur les nouveaux billons, (ce qui permet un enracinement plus profond). Le fond du sillon sur lequel le ruissellement s'écoulera restera très cohérent et couvert de cailloux, et déchets de préparation des sols. Enfin tous les 5 mètres, on décale les billons de façon que les eaux qui glissent dans les sillons soient freinées et les terres érodées se déposent (voir figure 68, Roose, 1994).

Quelques propositions d'amélioration

Pour contribuer à l'amélioration des techniques traditionnelles et de la productivité du milieu, deux approches bio-physiques sont proposées (Valet, 2013) :

- soit le contrôle presque total du ruissellement grâce à des techniques biologiques de couverture du sol par des mulch, des cultures associées, des prairies, le BRF (bois raméaux fragmentés), les cultures intercalaires et les jachères améliorées par semis de légumineuses ;
- soit le maintien d'un ruissellement minimum lors des événements rares entraînant peu d'érosion grâce aux clôtures, haies vives et mortes, rideaux d'arbres, talus enherbés combinés aux gros billons et planches paillées, agro-foresterie sur les pentes fortes.

Quelques exemples de ces techniques sont décrits ci-dessous :

*L'amélioration du bocage traditionnel en plantant tous les 2 à 3 m. sur les pentes cultivées des haies fourragères de *Leucaena*, *Calliandra* ou *Hibiscus*, taillées tous les 3 mois pour donner du fourrage au bétail en saison sèche et du paillage pour couvrir les sols cultivés/ billonnés en saison des pluies. Des bandes enherbées (légumineuses pérennes rampantes) implantées à l'aval des talus réduiront encore les transports solides. Les moutons au piquet pourront valoriser les fourrages produits sur les talus.

*Des petits cordons de pierres sont disposés sur les chemins d'eau pour freiner l'érosion. Sur les versants granitiques, les gros blocs encombrant les parcelles, seront repoussés sous les haies vives pour les renforcer.

*Un paillage léger provenant des haies vives voisines sera étendu sur les sillons avant que le couvert des cultures soit suffisamment développé ou sous les caféières pour réduire l'évaporation du sol.

*Le reboisement par *Eucalyptus* peut être associé aux cultures annuelles (oignons, pommes de terre et ail) sur des pentes de 40 à 60 %. Les deux premières années, les parcelles cultivées seront labourées et les racines traçantes éliminées pour forcer le réseau racinaire des *Eucalyptus* à développer des racines pivotantes. Ensuite on se contentera d'un travail léger au début des cultures. Les feuilles fourniront un paillage protégeant la surface du sol. Sur les pentes de plus de 60 %, le boisement d'*Eucalyptus* sera systématique avec interdiction de cultures avec labour. Les arbres doivent être suffisamment écartés (4m) pour laisser se développer un sous-étage fourrager protecteur du sol contre la battance des pluies. Il peut servir de parcours dès que les arbres auront dépassé 2 m. de haut. Sur les versants reposant sur un plan de glissement, les *eucalyptus* exploités en taillis tous les 5 -7 ans assècheront la nappe souterraine et empêcheront les glissements en masse. Ces plantations fournissent des revenus substantiels (vente des perches) (Fotsing, 1994).

*La construction de citernes dans les zones à forte densité de bâti, piégera l'eau des toits, des chemins et des ruisseaux : elle servira à l'irrigation d'appoint des jardins maraîchers et à l'abreuvement du bétail en semi-stabulation.

*Amélioration des jachères par l'introduction de légumineuses semées en dérobée sous la dernière culture après le sarclage.

Conclusions

*L'observation des effets de l'érosion sur les différents segments du paysage montre qu'en pays Bamiléké, la dégradation des sols n'est pas proportionnelle à la pente mais dépendante de l'intensité du couvert végétal au ras du sol.

Les programmes technocratiques de lutte antiérosive ont abouti dès 1940, à des échecs car les terrassements proposés (fossés de contour, terrasses) exigeaient un gros travail supplémentaire, le chevauchement avec les travaux culturels agricoles, le raclement de l'horizon humifère superficiel, le coût des engrais pour restaurer la fertilité perdue et le sacrifice d'un morceau de terrain agricole (Valet, 2013).

*Le recyclage maximum de tous les résidus de culture, des déchets de cuisines et des ménages doit être favorisé par l'implantation de « compostières - fumières – poubelles » dans les zones habitées, dans les trous creusés pour extraire les briques lors de la construction des cases, à l'ombre des arbres. Les produits décomposés seront apportés aux terres de maraîchage. D'autres fosses compostières pourraient stocker à la limite des terroirs pastoraux et des terroirs cultivés, les déjections ramassées sur le parcours des bestiaux (Fotsing, 1994).

*Cependant, la disponibilité limitée en biomasse, les pertes de nutriments par érosion ou drainage et les exportations des systèmes de cultures et d'élevage, aboutissent naturellement à un appauvrissement du sol en nutriments assimilables par les plantes. Le bilan étant généralement négatif sur les champs cultivés, les paysans cherchent à apporter du fumier ce qui aboutit au déplacement des nutriments du parcours vers les champs. Mais l'expérience montre qu'un apport complémentaire d'engrais minéraux est indispensable pour valoriser tout le potentiel de production d'un terroir (Roose, 2017).

*La réorganisation du marché des engrais, des circuits d'approvisionnement et de vente des produits permettrait de valoriser le potentiel agricole de ces régions. Enfin la refonte du système foncier donnerait aux paysans la sécurité foncière indispensable (Fotsing, 1993).

Bibliographie

- Ducet G. et Fotsing J.M., 1987. Evolution des systèmes agraires à Bafou, Ouest Cameroun. *Revue de Géogr. du Cameroun*, Yaoundé, 7, 1 : 1-18.
- Dupriez H., 1980. Cultures associées ou monocultures ? Validité du savoir paysan. Cahier d'Etudes du milieu et d'Aménagement du territoire. ENDA, Dakar, 24 p.
- Fotsing J.M., 1993. Erosion des terres et propositions de gestion conservatoire des sols en pays Bamiléké (Ouest-Cameroun). *Cah. Orstom Pédol.* 28, 2 : 351-366.
- Fotsing J.M., 1994. Evolution du bocage Bamiléké. In « Introduction à la GCES », *Bull. Pédol. FAO*, n°70 : 293-307.
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO* n°70, 420 p.
- Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie. IRD Editions, Marseille, 711 p.
- Segalen P., 1967. Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 5, 2 : 137-147.
- Valet S., 1999. L'aménagement traditionnel des versants et le maintien des cultures associées: cas de l'Ouest-Cameroun. Colloque « L'HOMME et l'EROSION ». Yaoundé, Cameroun. *Bull. Réseau Erosion* N°15. IRD, Montpellier, France. 28p.
- Valet S. et Osier-Lafontaine H., 2013. Ecosystem services of multispecific and multistratified cropping systems. In « *Sustainable Agriculture Reviews* », Vol 14 : 185-268.
- Valet S., 2017. Rôle des cultures associées pour restaurer la productivité des sols du NO du Cameroun. In « Restauration de la productivité des sols... », IRD Editions : 285-296.

Photo - Culture agro-forestière traditionnelle des femmes bamiléés sur grosses buttes sur de 30 à 50 %- Route Dschang - plaine des M'Bos (Cliché Valet S., 1968)

[Fig.14.2+14.3.Organisation traditionnelle de l'espace \(fragments d'un quartier du plateau granitique\)](#)



Chapitre 15

Potentiel d'une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens utilis*) pour la restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide dans une zone de plateaux densément peuplés du sud BENIN

B. Barthès, A. Azontonde, E. BLANCHART, E. Roose

1. Problématique

Traditionnellement, dès qu'une terre ne produit plus assez, les paysans abandonnent le champ à la jachère naturelle jusqu'à ce que la végétation semble avoir restauré suffisamment le sol : cela peut prendre 5 à 30 ans selon les conditions climatiques. Mais avec la croissance démographique et la pression foncière, les jachères sont réduites à quelques mois et ne peuvent plus maintenir le taux de matière organique, ni la productivité des sols tropicaux. Les cultures ne protègent plus suffisamment les sols des pluies agressives, du ruissellement et de l'érosion. Avec la dégradation des horizons humifères, l'agriculture n'arrive plus à nourrir les paysans et les citoyens.

Sur les plateaux du Sud Bénin où la population peut dépasser 400 habitants par km², les sols ferrallitiques sablo-argileux acides sont presque entièrement couverts de cultures (maïs, haricots, manioc, arachide associés généralement aux palmiers à huile). Lors d'une première étude (1964 à 74) on a comparé les effets du défrichage avec ou sans brûlis sur la faible production du maïs (Azontonde, 1993). Lors d'une seconde étude (1975-88) sur parcelles d'érosion furent testées diverses techniques culturales qui ont réduit l'érosion mais n'ont pas réussi à maintenir l'humus et la productivité des sols.

En 1989, deux techniques de restauration de la production du maïs, l'une chimique (apport d'engrais minéraux) et l'autre biologique (*Mucuna* semé entre les lignes de maïs la première année, ensuite le maïs est semé sous la litière du *Mucuna*), ont été comparées à la technique traditionnelle sans engrais mais avec enfouissement de la courte jachère naturelle au début de la seconde année). Les résultats montrent que, en 5 ans, l'association avec

Mucuna a réduit considérablement le ruissellement, l'érosion et l'acidité du sol et augmenté le rendement en maïs grain, le stockage du carbone et la biodiversité de la faune dans le sol (Barthès et al., 2005 ; Blanchart et al., 2006). Ce système cultural a ensuite été diffusé dans le milieu paysan et a donné de grands espoirs dans cette zone très peuplée.

2. *Milieu et expérimentation*

Le site expérimental de Agonkamey (2° 20'E., 6° 24'N ; alt. 20 m) situé à proximité de Cotonou, dans le Sud-Bénin, est soumis à un climat tropical subhumide caractérisé par deux saisons sèches (durée de 2 et 4 mois) alternant avec deux saisons pluvieuses totalisant 1200 mm/an : la température moyenne annuelle atteint 27°C. Trois séries d'essais ont été réalisées en milieu paysan et en station de recherche, sur sept parcelles d'érosion (30 x 8m, pente de 4 %), sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés et appauvris, développés sur des matériaux sédimentaires argilo-sableux du continental terminal appelés « terres de barre » (Azontonde, 1993). Contrairement aux autres exemples de cet ouvrage, il ne s'agit pas d'un milieu montagnard, mais d'un plateau à forte densité de population dont les sols s'appauvrissent et s'acidifient par exportation des récoltes annuelles, par érosion, ruissellement et drainage, par déséquilibre entre les pertes et les apports de matières organiques et minérales.

De 1964 à 1974, sont testés les techniques traditionnelles de défrichement, brûlis ou non, et semis de maïs durant la grande saison des pluies et jachère naturelle pendant la petite saison des pluies après la récolte (Roose, 1976).

De 1975 à 1988, sont comparés *en milieu paysan* le labour à la houe sur 10 cm après enfouissement de 0 ou 10 t/ha de fumier(D) ou de *Stylosanthes* (B), semis de maïs et 2 sarclages. **En station sont comparés**, -témoin (T1)= grattage, brûlis des résidus + 2 sarclages; -semis direct sur résidus de récolte du maïs;-labour + billonnage isohypse (A)+ 2 sarclages.

De 1989 à 1999. En milieu paysan : -témoin (T) labour à plat, brûlis et 2 sarclages ; (E2) = renouvellement du *Mucuna* tous les deux ans ; (E1) = maïs et *Mucuna* associés tous les ans.

En station : -Témoins (T2)= grattage superficiel à la houe, semis et 2 sarclages;-Fumure minérale(NPK) = 200 kg de N15-P15-K15 + 100 kg d'Urée + grattage et 2 sarclages ; Maïs + *Mucuna* (M) tous les ans (E1) ou tous les 2 ans (E2) + grattage et 2 sarclages.

Le Mucuna est semé entre les lignes de maïs en poquet tous les 80 cm, après le premier sarclage, le 30 ème jour. Il se développe lentement sous le maïs, puis rapidement après la récolte. Il se dessèche sept mois après le semis et un grattage léger permet de semer le maïs dans la litière de Mucuna desséchée la saison suivante.

3. **Résultats des tests de 1975 à 1988 et discussion**

Le grattage léger suivi du brûlis (témoin traditionnel) et le grattage laissant en surface les résidus de la culture de maïs ont contribué à augmenter le ruissellement (Kram de 51 à 56 %) et l'érosion (de 35 à 45 %) et à réduire le stock de matières organiques du sol (de 1.3 à 0.6% sur l'horizon 0 à 10 cm) et les rendements en maïs grain (de 50 à 76%). Quant au labour isohypse, il a réduit le ruissellement, mais aussi le stock de carbone et surtout les rendements en maïs (de 3,5 à 0,2 t/ha/an) ; il a augmenté l'érosion.

Seul l'enfouissement de fumier par le labour (D) donne des résultats intéressants : le ruissellement est réduit à 20%, le stock de carbone est maintenu à 2-3 % et les rendements à 3-4 t/ha/an de grains, malgré la croissance de l'érosion de 1 à 2 t/ha/an (Azontonde, 1993).

De ces résultats, on peut conclure que le brûlis et le travail répété du sol aboutissent à la minéralisation accélérée des M.O., à la dénudation de la surface du sol, à la destruction des agrégats et en conséquence, à l'augmentation des risques de ruissellement et d'érosion. La chute des rendements en est une conséquence évidente.

Le maintien des résidus de culture du maïs (1 t/ha/an) à la surface du sol n'a pas réussi à protéger le sol contre l'énergie des pluies, ni à maintenir le stock de carbone du sol. Le rendement en grains et les taux de M.O. ont régulièrement diminué pour se retrouver après 12 ans à un niveau critique (0,4 % de C). En basse Côte d'Ivoire, Roose avait obtenu en 1973 des résultats similaires sur des pentes plus fortes (7-12-20%) sur des sols sableux semblables.

Le labour en courbe de niveau a réduit quelque peu le ruissellement, mais pas l'érosion. Il a conduit à une chute du stock de carbone et des rendements. Le billonnage en courbe de niveau a réussi à réduire le ruissellement et l'érosion, mais pas à conserver la fertilité des sols (Roose, 1973). Par contre l'apport de fumier (10t la première année puis 5 t/ha tous les deux ans) a enrichi les vingt premiers cm du sol (C= 3 % après 5 ans), mais on constate tous les deux ans des baisses importantes de carbone durant l'année sans apport de fumier. Cependant cette technique bien connue n'a pu être adoptée par les paysans qui, n'habitant pas dans une zone d'élevage (à cause de la mouche tsétsé), ont trouvé cette technique trop contraignante (Azontondé, 1993). Le problème de la dégradation des terres de barre reste donc entier.

4. **Résultats de 1989 à 1999 et discussion sur l'usage du *Mucuna*.**

Sur la parcelle témoin sans engrais ni apport organique, le ruissellement et l'érosion augmentent progressivement de même que l'acidité du sol (pH = 4,8) tandis que le taux de MO du sol a baissé (0.5 %) ainsi que le rendement en grains de maïs (1,3 à 0,6 t/ha/an). Ces effets sont dûs à la faiblesse des restitutions organiques et minérales sous culture continue de maïs sur brûlis de la jachère.

Le renouvellement du couvert de *Mucuna* tous les deux ans (E2) a maintenu le pH du sol, amélioré le taux de MO (0,6 à 0,9%) et le rendement en maïs (0,2 à 1,1 t/ha/an). En même temps, grâce à la bonne couverture du sol et à son enracinement, le *Mucuna* a réduit

l'érosion et le ruissellement de 25 % et augmenté l'activité des vers de terre : il pourrait restaurer la fertilité du sol appauvri par la culture continue.

Le renouvellement de la jachère à *Mucuna* tous les ans (E1) a permis de réduire l'acidité du sol, d'augmenter nettement le taux de MO (0,6 à 2 %) et les rendements en maïs (0,2 à 2,8 t/ha/an) tandis que les risques de ruissellement et d'érosion deviennent négligeables.

L'apport de fumure minérale (E3) entraîne une légère baisse du pH (5,5 à 5,3), mais une croissance remarquable du taux de MO (0,8 à 1,6 %), du rendement en grains (0,5 à 2,5t/ha/an) et en biomasse. Cependant, la production en grain ne permet pas au paysan de se nourrir et de payer les engrais nécessaires : d'où le peu d'adoption de ce système de fumure minérale, trop coûteuse pour les paysans (Azontonde, 1993).

5. Evolution du stock de carbone et son origine

De nombreux échantillons de sols sur 40 cm ont été prélevés en 1988, 1995 et 1999 en vue de déterminer le taux de carbone total, N total et la densité. De même la biomasse aérienne de la litière, du maïs, du *Mucuna* et des adventices de la jachère naturelle a été déterminée chaque année. On a prélevé à la main les racines du maïs et du *Mucuna* pour calculer la biomasse souterraine sur des monolithes de 40 cm d'épaisseur. Toutes les méthodes ont été décrites en détail dans Barthès et al. (2004) et analysées statistiquement.

La teneur en argile du sol augmente en profondeur et aussi en surface pour le témoin (= décapage par l'érosion en nappe). Le pH est acide (<6) et baisse de 0,5 unités en une décade sur les parcelles « témoin et NPK ». Le stock de carbone total sur 40 cm varie peu en 1988 en fonction des parcelles. Après douze années, il atteint finalement 24, 29 et 41 t de C/ha pour les traitements « Témoin, NPK, *Mucuna* ». Dans cet essai, la jachère de *Mucuna* apporte en moyenne 1,3 t C/ha/an séquestré dans les horizons humifères du sol. Ailleurs divers auteurs ont montré que des jachères de 1 à 2 ans de légumineuses pouvaient séquestrer 0,2 à plus de 2 t C/ha/an sur 10 à 30 cm de profondeur. Ces résultats confirment que les résidus de mulch de légumineuses sont capables de stocker du carbone dans les sols tropicaux.

Pour les traitements « Témoins, NPK, et M1 », la biomasse des résidus qui retournent chaque année au sol atteint 8,0 – 13,0 – 19,9 t/ha/an, ce qui représente 3,5 – 6,4 – 10 t C/ha/an dont 39 – 74 – 84 % proviennent de la biomasse aérienne. Des analyses d'abondance naturelle dans la parcelle Témoin montrent que le carbone récent provient essentiellement des adventices (17% aérien, 55% des racines). Par contre sur la parcelle fertilisée « NPK » le C provient surtout du maïs (61% d'aérien, 14% des racines). Enfin sur M, maïs et *Mucuna* apportent la même proportion de carbone (40% en aérien et 8% des racines). Le carbone récent provenant de la biomasse produite durant la période expérimentale représente 9 -11- 72% du carbone stocké dans la litière et le sol. Le taux de croissance du C dans le sol est lié à l'importance de la biomasse du *Mucuna* : il représente 11 à 15 % du carbone de la biomasse apportée par le *Mucuna*. La contribution des adventices croissant durant la seconde partie de l'année est importante sur les parcelles témoin et NPK : les mauvaises herbes représentent 49 et 20 % de la biomasse aérienne dans T et NPK.

Si le *Mucuna* représente 70 % de la biomasse c'est probablement parce que la litière de *Mucuna* se décompose lentement. Quelle que soit la profondeur, le C issu du maïs ne représente que moins de 6 % sous NPK et *Mucuna*....et moins de 1,5 % dans la parcelle témoin.

En novembre 1999, le carbone issu de la biomasse produite représente 9-11 et 72 % du carbone séquestré dans la litière + horizon 0- 40 cm.

L'apport des adventices à la biomasse apportée au sol est importante dans les parcelles témoins de maïs (49 %), M + NPK (20 %) vu l'absence de maïs pendant la petite saison des pluies. Par contre les adventices disparaissent sous *Mucuna* qui apporte autant que le maïs (50%). C'est une des raisons de l'adoption du *Mucuna* par les paysans.

L'apport d'engrais minéraux (NPK = 76 kg de N/ha) ou de légumineuses fixatrices d'azote (= >250 kg de N/ha) peut entraîner l'émission de gaz N-N²O qui sont 300 fois plus dangereuses que le CO² pour le réchauffement climatique. Cette émission est équivalente à 0,2 t C-CO²/ha /an c.a.d. équivalente à la séquestration du carbone sur NPK. Le *Mucuna* peut émettre 4 kg de N-N²O soit 0,5 t C-CO²/ha /an ... Une part de la séquestration du C dans le sol peut être contrecarrée par l'émission de gaz azotés.

En fin d'expérience, le stock de carbone séquestré sur 40 cm atteint 24, 29, 41 t C /ha sous maïs témoin, NPK et maïs-mucuna respectivement : ces valeurs sont comparables avec celles de la littérature disponible au Bénin, Nigéria (Lal, 2000), au Brésil (Bayer et al , 2001), au Honduras (Triomphe, 1996) sur Ultisols, Oxisols, Alfisols, Inceptisols sous maïs fertilisé, non-labour, maïs -*Mucuna* ou *Pueraria* (Barthès et al., 2004).

L'apport de carbone par ces systèmes de litière/plante de couverture sous culture varie de 0,2 à >2 t C/ha/an en fonction du volume et de la qualité (C/N) de la biomasse apportée, du taux d'argile et de l'intensité du travail du sol (Feller et Beare, 1997).

En conclusion, ce système de production de maïs associé à une légumineuse de couverture (*Mucuna*) a produit une biomasse importante et séquestré 1,3 t C/ha/an : ces savanes tropicales ont donc un grand potentiel de séquestration du carbone, mais les émissions de N²O par le *Mucuna* réduit légèrement ce potentiel. Ceci mériterait des études plus approfondies sur les diverses légumineuses disponibles.

Les mesures d'abondance du C13 naturel montrent qu'en fin d'expérience, le carbone séquestré dans la litière + 40 cm de sol ne représente que 4 % du carbone total des résidus de Maïs. Par contre le C venant du *Mucuna* représente plus de 50 %. Il est probable que le mulch de *Mucuna*, riche en azote, accélère la minéralisation des MO initiales, mais minéralise lentement lui-même. La proportion de carbone séquestrée originaire des adventices représente 10 % du carbone total du champ de maïs, qu'il soit fertilisé ou non. Il est donc impérieux de mieux estimer la variabilité de la biomasse des adventices au cours de l'année et son mode de gestion.

La disparition des adventices sous *Mucuna* est l'une des raisons de son adoption par les paysans.

6. Effets à long terme de la couverture de *Mucuna* sur la faune du sol sous culture de maïs

De nombreuses études ont souligné l'intérêt des légumineuses de couverture pour assurer durablement la productivité des sols cultivés. Cependant les mécanismes responsables ne sont pas entièrement connus : la diversité des activités de la faune du sol permet de mieux comprendre les flux de nutriments et la dynamique de la structure du sol. C'est pourquoi on a profité de ces trois parcelles de 12 ans à Agonkamey pour évaluer la densité, la diversité et la composition fonctionnelle des nématodes et des macroinvertébrés en fonction (T) de la culture traditionnelle du maïs, (NPK) idem avec apport de fertilisants minéraux et (M) culture de maïs associée à une légumineuse de couverture (*Mucuna*) (Blanchart et al., 2006).

L'expérimentation sur la conservation et la restauration des sols soumis à la culture de Maïs a été décrite en détail par Azontonde (1993) et Barthès et al., (2004). Pour estimer la macrofaune, six monolithes de 25 x 25 x 30 cm ont été prélevés sur chaque parcelle. Pour évaluer les nématodes 3 x 3 échantillons ont été prélevés dans les horizons 0-10 cm, 10-20 et 20-30 cm. De chaque échantillon on a extrait 190 nématodes, identifiés au microscope (x 400) et classés par famille, genre ou groupe alimentaire.

Macrofaune : on a extrait à la main 5648 individus dont la fréquence s'élève à 3423, 3765 et 7887 individus par m² respectivement en T, NPK et M. Les termites sont les plus fréquents (70 % dans NPK, 86 % dans M). Viennent ensuite les fourmis (2,5% dans M, 16 % dans NPK & T), puis les vers de terre (3% dans T, 10 % dans NPK et 7% individus dans *Mucuna*). On a trouvé peu d'animaux dans l'horizon superficiel de NPK : les termites et fourmis sont descendus dans l'horizon 10-20 cm contrairement aux parcelles T et M. La biomasse atteint 10-22 et 41 g/m² pour T-NPK et M. La parcelle *Mucuna* a présenté la plus haute densité de macrofaune (surtout pour les termites, vers de terre, millipodes, centipodes) et la plus grande biomasse (surtout pour les vers de terre et les termites).

Nématodes : les parcelles de *Mucuna* ont montré la plus forte densité de nématodes phytophages facultatifs, les bactériophages et les prédateurs et la plus faible densité de nématodes phytophages obligatoires (*Criconemella*, *Scutellonema*, *Meloidogyne*). La modification de la composition et de l'activité de la faune peut expliquer partiellement la capacité du *Mucuna* de restaurer la productivité du sol (Blanchart et al., 2006).

7. Conclusions

*La culture continue de maïs et le brûlis des jachères et des résidus de culture conduit à court terme à la diminution du pH, de l'humus et des nutriments du sol, à la dégradation de

sa structure, à l'augmentation du ruissellement et de l'érosion et par conséquent à la réduction de sa productivité.

*Un essai de longue durée a donc été mis en place sur parcelles d'érosion à proximité de Cotonou en milieu soudano-guinéen, pour évaluer d'abord les risques d'érosion lors du défrichement avec ou sans brûlis, puis tester les techniques culturales (travail isohypse du sol, billonnage, fertilisation minérale, jachère naturelle courte) pour réduire les pertes organiques et minérales par ruissellement et érosion, l'acidification du sol, la gestion des déchets (résidus de récolte, adventices, fumier). Alors que le labour et le billonnage en courbe de niveau réduisent le ruissellement et l'érosion lors des pluies moyennes, ils ne résistent pas aux tornades tropicales et n'améliorent pas la durabilité de la fertilité des sols. Seul l'apport régulier de fumier (5 à 10 t/ha/2ans), améliore durablement le rendement en maïs. Mais n'étant pas en zone d'élevage (présence des mouches tsétsé), les paysans ne disposent pas de fumier et n'ont pas accepté cette solution.

*Une deuxième série de mesures a été mise en place sur ces parcelles dégradées ($C < 0,4$ %) en 1988 pour tester l'efficacité de deux modes de restauration de la productivité du sol face au système traditionnel (maïs -jachère naturelle) :

- par voie chimique : compensation des pertes en NPK,
- par voie biologique : culture associée d'une légumineuse de couverture (Mucuna) et semis direct dans les résidus de la culture précédente.

*L'apport des engrais minéraux a augmenté la couverture végétale, réduit le ruissellement et l'érosion, acidifié faiblement le sol, mais augmenté significativement le carbone du sol et la productivité en maïs. Cependant le coût des engrais a tellement augmenté que les paysans ne peuvent assurer à la fois leur nutrition et l'achat des engrais chaque année. Cette possibilité de restaurer la production n'a donc pas été acceptée par les paysans.

*L'introduction du Mucuna en culture associée, non exploitée comme fourrage, mais laissée comme paillage durant la petite saison des pluies, a rapidement réduit le ruissellement et l'érosion, progressivement amélioré l'acidité du sol, la teneur en carbone et durablement la production du maïs : cette approche s'est rapidement diffusée dans la région.

*Dans les parcelles T-NPK-M, le taux de carbone séquestré sur 40 cm de sol atteint -0.2, + 0.2, + 1,3 t de C/ha/an suite à des apports de 3.5, 6.4 et 10 t de C /ha/an.

L'introduction d'une légumineuse de couverture dans un système traditionnel de culture du maïs modifie la structure, la densité, la composition et la diversité de la faune du sol et stimule les organismes qui développent la structure du sol et la disponibilité des nutriments. Les raisons de cette influence ne sont pas encore tout à fait claires mais on peut déjà avancer la qualité et la quantité de matières organiques, la disponibilité de l'Azote fixé par les légumineuses, le microclimat sous l'abondante couverture de Mucuna qui protège la

surface du sol de l'agressivité des pluies et du soleil, favorise l'aération de l'horizon superficiel, réduit le ruissellement et l'érosion. Il faudrait donc inclure les activités animales dans les indices de fertilité des sols et mieux gérer la ressource en couverture de légumineuse et des organismes de décomposition des litières pour améliorer la productivité et la durabilité des écosystèmes cultivés.

8. Bibliographie

Azontonde A. 1993. Dégradation et restauration des terres de barre, sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux au Bénin. *Cah. Orstom Pédol.*, 28, 2 : 217-226.

Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Lesaint S., Oliver R., Feller C., 2004. Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens utilis*) on soil carbon in an Ultisol under Maize cultivation in southern Benin. *Soil Use & Management*, 20 : 231-239.

Barthès B., Azontonde A., Feller C., 2017. Effets du *Mucuna* sur la production et la durabilité de systèmes de culture à base de maïs au Sud-Bénin. Chap 31 p. 415-428. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie. Eds. E. Roose, IRD Editions, Marseille, 711 p.

Bayer C., Martin-Neto L., Mielniczik J., Pillon C., Sangoi L., 2001. Changes in organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil SC. Soc. Am.J.*, 65 : 1473 – 1478.

Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontonde A., Feller C., 2006. Long-term effect of a legume cover (*Mucuna pruriens utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation in southern Benin. *European Journal of Soil Biology* 42 : 136-144.

Feller C., et Beare M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79 : 69-116.

Lal R., 1998. Land use and soil management effect on soil organic matter dynamics on Alfisols in Western Nigeria. In : Soil processus and carbon cycle. Eds R. Lal, JM. Kimble, RF. Follet and BA. Steward, CRC Press Boca Raton, Fl. :109-126.

Roose E., 1973. Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse doct.ing. Fac. Sciences, Abidjan, Travaux et Documents n° 78, ORSTOM Paris, 108 p.

Roose E., 1976. Le problème de la conservation de l'eau et des sols en République du Bénin : mise au point en 1976. Rapport ORSTOM/ FAO, Abidjan, 34 p.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie. Eds. Eric Roose, IRD Editions, Marseille, 711 p.

Triomphe B., 1996. Un système de culture original et performant dans une zone de montagne du tropique humide : la rotation maïs/mucuna au Nord- Honduras. In : Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. Eds.J.Pichot, N. Sibelet et JJ. Lacoëuilhe, Cirad -Min. Coopération Paris : 318-328.

Chapitre 16

Quelques plantes utiles pour maîtriser l'érosion et restaurer la fertilité des sols tropicaux

Par Henri-Dominique Klein, Eric ROOSE et Régis Peltier

1. Problématique

Depuis 50 ans, on assiste dans les pays du Sud au doublement de la population tous les 20 ans, au développement des villes, à la réduction des parcours, à l'appauvrissement de la fertilité des sols, à la réduction du couvert végétal et à l'augmentation des risques de ruissellement et d'érosion. En outre, le changement climatique risque fort d'augmenter les phénomènes pluviaux ou cycloniques extrêmes, alternant avec des sécheresses.

Pour faire face à l'augmentation des besoins de base, on a développé la mécanisation des travaux culturaux (labour, sarclage, billonnage) et de la lutte antiérosive (fossés, diguettes, banquettes, terrasses) entraînant l'extension des cultures plus que la productivité des terres.

Comme la conservation de l'eau et des sols (CES) réduit les pertes en terre, mais n'augmente pas nécessairement les rendements des cultures, la révolution verte a poussé à l'apport des intrants (engrais, herbicides, pesticides, irrigation) au point de ruiner les petits paysans, lors des années sèches, obligés d'abandonner leur terre aux grosses sociétés qui leur ont prêté le financement des intrants.

Dès les années 1980, des agronomes ont cherché à développer des systèmes de production intensifs mais exigeant moins d'investissement et respectant mieux les paysans et l'environnement (Roose, 1994 ; Dupriez, 1993 ; Billaz, 2016). Vu l'augmentation du coût des engrais minéraux, les agronomes ont poussé les paysans à développer les fumures organiques et les méthodes biologiques de gestion de l'eau et des nutriments des sols (Roose, 1994, 2017).

C'est pourquoi il nous a semblé utile de réunir dans ce chapitre des plantes (ligneuses et herbacées) et particulièrement des légumineuses qui peuvent être utiles pour protéger les sols cultivés de l'énergie des pluies et du ruissellement, augmenter le stock d'eau disponible pour les cultures, produire une abondante biomasse capable de séquestrer du carbone et produire de l'humus stable, nourrir le bétail, pailler les sols, fournir divers nutriments à la surface et dans le sol (jachère, compost, paillage, fumier) et restaurer leur fertilité (fixation de l'azote de l'air, phosphore assimilable + Ca +Mg +K qui vont améliorer le pH).

2. Les zones écologiques

Dans la liste des plantes utiles qui suit, on distinguera 7 groupes de plantes capables d'aider à la lutte antiérosive et à la restauration de la fertilité des sols en fonction de six situations écologiques :

1- les montagnes humides (MH) : des sols volcaniques fertiles, des sols humifères acides ou des sols caillouteux superficiels, un climat tropical d'altitude (alt.>1000 m), des pentes fortes, des prairies et des forêts d'altitude ;

2- les plaines et collines équatoriales humides (Eq): sols ferrallitiques acides lessivés, pluies abondantes (>1500 mm et saison sèche de <3 mois), des collines en demi-orange, des plateaux interrompus par des vallées à pentes raides ;

3- les plaines tropicales subhumides (Th = soudanien) ; des sols ferrugineux sableux lessivés et acides, des vertisols argileux fertiles, des savanes arbustives fréquemment brûlées, une seule saison des pluies, agressives mais irrégulières, de 1000 à >1500 mm, une saison sèche de 4 à 6 mois ;

4- les plaines et collines à climat tropical sec (TS) (P= 1000 à 400 mm avec 6 à 8 mois secs et des orages erratiques), des sols ferrugineux sableux peu lessivés, des vertisols ou des sols alluviaux dans les plaines, des savanes herbeuses ou des steppes ;

5- les plaines sahéliennes et montagnes subdésertiques (SD) (Pluies de 400 à 100 mm/an, une courte saison humide et des averses irrégulières), des sols bruns rouges, des sols salés ou calcaires ou des dunes sablonneuses. La température varie de 15 à 35°C au Sahel, avec des écarts nocturnes importants. Il s'agit d'une vaste étendue de steppes herbeuses et arbustives sahéliennes entre Dakar et la Somalie.

6- les collines méditerranéennes ; pluies de 400 à 1500 mm, une longue saison sèche et chaude et une saison humide et froide, des sols rouges, des sols noirs vertiques et bruns sur marnes ou roches sédimentaires dures, des sols calcaires ou salés, depuis des montagnes jadis recouvertes de forêts jusqu'aux plaines semi-arides.

3. Des plantes de couverture associées aux cultures (en vue du semis direct)

Il s'agit de plantes herbacées semées entre les lignes de maïs, sorgho, coton, etc., avec 2 ou 3 semaines de retard par rapport à la culture principale, lors du premier sarclage, en même temps que l'apport d'un complément minéral. Leur croissance est d'abord lente sous le couvert principal, mais suffisant pour réduire la croissance des adventices, sans trop

concurrencer la culture. Dès que la récolte principale est terminée, ces légumineuses envahissent le terrain et étouffent les adventices résiduels.

Si on protège ces champs des feux de brousse et du bétail, le sol reste couvert d'une végétation sèche qui a produit un grand nombre de graines, si bien qu'il est relativement aisé de procéder au semis direct de la culture principale sous cette litière dès la première pluie de la deuxième campagne (économie du labour et du sarclage). Problème : en Afrique, les feux de brousse et la vaine pâture sont traditionnels.

*Montagnes :

- *Dactylis glomerata*, *Pennisetum pedicellatum*, *Chloris gayana*, *Brachiaria ruziziensis*, *Setaria sphacelata* (Rwanda, Neuman et al., 1985 ; Ndayizigiye, 2017) : graminées fourragères.

*Plaines équatoriales :

- *Stylosanthes gracilis* et *S. guyanensis*, (légumineuses des zones forestières humides de Côte d'Ivoire et des plateaux de Madagascar) : graines abondantes, germination après 24 heures de trempage dans l'eau chaude ; bon fourrage à couper et à pâturer.

- *Pueraria phaseoloides* : peut être utilisé comme plante de couverture avec des plantes pérennes, comme le palmier à huile, l'hévéa ou le cocotier, mais cette légumineuse lianescente peut devenir invasive et étouffer la culture principale. Chez les petits agriculteurs, mieux vaut préférer des légumineuses moins envahissantes et produisant des graines comestibles (arachide, niébé, etc.).

- *Centrosema pubescens* : fournit un bon fourrage pour le bétail.

- *Crotalaires*, *Arachis pintoii* (Martinique) : légumineuses à semer entre les lignes de maïs ou de bananiers.

*Plaines tropicales subhumides :

- *Mucuna pruriens var. utilis* : (ex. Sud Bénin), légumineuse rampante, semis entre les rangs de maïs/coton, se développe bien avant la 2ème campagne, se ressème naturellement, restaure bien le C, N pH du sol et améliore durablement les rendements ; fourrage peu apprécié par le bétail. Il peut être utilisé pour contrôler les herbacées invasives comme *Imperata cylindrica*.

- *Centrosema pubescens*, *Pueraria phaseoloides*, *Crotalaria sp.* : légumineuses intercalaires utilisées au Nigeria central (Lal).

*Plaines tropicales sèches :

- *Calopogonium mucunoïdes* : zone soudano-sahélienne, plaines semi-arides (Nord-Cameroun : Boli *et al.*, 2017) ; graines abondantes ; convient pour le semis-direct ; restaure bien le sol, bon paillis qui protège contre le ruissellement et l'érosion ; fourrage consommé seulement par les ânes et les bovins quand il ne reste rien d'autre à brouter.

- *Stylosanthes hamata* : convient pour les zones de savanes plus sèches (Nord-Côte d'Ivoire, Nord Burkina, savanes du N.E. du Rwanda) : graines abondantes à tremper dans l'eau chaude durant la nuit ; cette légumineuse couvre lentement le sol et améliore sa fertilité mais elle a un effet sur la résistance à l'érosion moindre que certaines graminées ; un mélange Graminées-Stylosanthes est à rechercher ; un des meilleurs fourrages tropicaux pour le gros et petit bétail.

-*Pueraria phaseolides*, *Desmodium intortum*, *Centrosema pubescens* : bons fourrages utilisés à Madagascar et dans toute l'Afrique.

4. Des jachères forestières : la jachère est le plus vieux moyen utilisé par les agriculteurs pour restaurer la fertilité des sols épuisés par la culture sans intrant et pour contrôler les plantes envahissantes, les maladies des cultures et les insectes qui leur sont nuisibles.

Tant que le sol contient des graines, tubercules, souches d'arbres et racines capables d'émettre des rejets, drageons et marcottes, mieux vaut laisser se développer la végétation forestière naturelle. Celle-ci a une bonne biodiversité et contient de nombreuses espèces bien adaptées aux conditions écologiques locales.

Mais les agriculteurs seront d'autant plus motivés pour conserver ce recru et le protéger du feu, qu'il contiendra des plantes utiles pour leurs productions (bois, fruits, pharmacopée, chenilles comestibles, gomme, produits de vannerie, etc.) et des services (protection et restauration de la fertilité du sol, régulation de l'infiltration des eaux de pluie, abri du gibier, abri et pâturage aérien du bétail, etc.). Pour enrichir ces jachères naturelles en plantes utiles, on pourra procéder à des plantations dites d'enrichissement ou, le plus souvent, à la technique de La Régénération Naturelle Assistée ou RNA (Peltier *et al.*, 2014). Par exemple, en République Centrafricaine, au sud de Bangui, les agriculteurs qui pratiquent l'agriculture sur brûlis en zone de contact entre forêt et savane, craignent la « savanisation » de leurs terroirs. Appuyés par le projet PDRSO, ils pratiquent la RNA au cours du sarclage de leurs champs de manioc et de leurs bananeraies. Les espèces de grands arbres qu'ils ont conservés en plus grand nombre sont : *Ceiba pentandra*, *Terminalia superba*, *Ricinodendron heudelotii*, *Albizia zygia*, *Pycnanthus angolensis*, *Triplochiton scleroxylon*, *Entandrophragma angolense*, *Morus mesozygia*, *Staudtia kamerunensis*, *Piptadeniastrum africanum* et *Pouteria altissima*. Les arbres de taille moyenne sont : *Myrianthus arboreus*, *Ficus mucoso* et *Macaranga barteri*. Les petits arbres sont représentés par : *Ficus exasperata*, *Dracaena arborea*, *Rauvolfia caffra* et *Tabernaemontana crassa* ; les arbustes par *Trema orientalis*.

Par contre, en savane naturelle, ou lorsque le sol a été dégradé et la végétation naturelle remplacée par des plantes invasives, en particulier en raison du passage répété des feux, la plantation s'avère souvent indispensable, doublée par une protection contre la concurrence herbacée et le feu (installation des jeunes arbres en association avec des cultures (méthode Taungya) et ouverture d'un pare-feu désherbé de 10 m de largeur autour de la plantation. Notons que l'espèce herbacée invasive *Imperata cylindrica* est particulièrement difficile à éradiquer et nécessite souvent un coûteux arrachage manuel ou l'utilisation de désherbants chimiques qui présentent des risques pour les utilisateurs et l'environnement. Mieux vaut donc intervenir avant d'en être arrivé à une prairie d'*Imperata* !

Il s'agit alors de planter toute la surface du terrain avec des arbustes ou des arbres à croissance rapide et à écartement relativement faible (3 x 3m pour les acacias), capables de contrôler les herbacées invasives et de restaurer la fertilité du sol en quelques années (5 à 10 ans, au lieu de 20 à 30 ans pour une jachère naturelle sur savane). Par leur réseau racinaire, leur litière et la biomasse (hors bois de chauffe) enfouie par labour ou déposée en paillage à la surface du sol, ces jachères favorisent les activités de la faune et de la microflore du sol, la formation d'humus, la porosité du sol et la richesse en nutriments assimilables extraits de la roche altérée, de l'air, des poussières et des pluies (Harmand et Balle Pity, 2001). Parmi les espèces les plus citées dans la littérature, on peut noter :

****Tephrosia vogelii*** : Alt : 1500 m, haut plateau Madagascar) M.A. Razafindrakoto, 2017.

****Tephrosia candida*** : SE Nigeria, plaines humides, ultisol acide (Ikpe et Gbaraneh, 2017).

****Acacia auriculiformis*** : Rép. du Congo Kinshasa, Congo Brazza, Rép. Centrafricaine, tropical humide, sol sableux (Peltier *et al.*, 2017). Cette légumineuse arborée contrôle bien les plantes invasives (*Chromolaena odorata* et *Imperata cylindrica*) et produit de grandes quantités de bois utilisé pour la fabrication de charbon de bois, ce qui fournit de bons revenus aux agriculteurs qui l'introduisent en rotation avec leurs cultures. Cependant, si on utilise plusieurs fois la rotation entre culture de maïs + manioc et jachère à acacias, sans aucun amendement, on finit par appauvrir et acidifier le sol (Dubiez *et al.*, 2018). Un apport de roche broyée contenant du calcium et du magnésium peut corriger cette baisse progressive de fertilité.

****Acacia polyacantha* et *Acacia senegal*** : en zones soudano-sahéliennes, ces légumineuses arborées fournissent du bois de feu, de la gomme arabique et du fourrage pour les petits ruminants et peuvent redonner leur fertilité en une dizaine d'années de plantation à des sols épuisés par les rotations de culture sorgho-coton pratiquées pendant plusieurs décennies.

* ***Senna siamea* (caesalpiniaçée)** fournit un bon bois de feu et de services, mais les agriculteurs préfèrent planter cette espèce en bord de route ou de parcelle, où ces arbres peuvent être émondés « en têtard »: Nord Cameroun, climat tropical sub-humide, sol ferrugineux très sableux, (Harmand *et al.*, 2017) ; produit en même temps du bon bois de feu et de construction (Burkina, Dupriez *et al.*, 1993).

* ***Calliandra calothyrsus*** : haies vives en montagne sur sol acide (Rwanda, Ndayizigiye),

* ***Flemingia congesta*** : climat tropical humide (Plateau malgache, Razafindrakoto)

* ***Leucaena leucocephala* (plateau malgache, Razafindrakoto)** (attention, cette légumineuse qui produit de nombreuses graines peut devenir envahissante, en particulier sur les talus, bords de canaux et de route) : arbuste très utilisé comme haie vive (Rwanda, König, Ndayizigiye, 2017).

* **Jachère bananière** considérée plus efficace que la jachère forestière au Burundi (Duchaufour, 2017). Grâce à la production très élevée de biomasse, le bananier améliore la fertilité du sol plus que les autres types de jachère, tout en produisant des bananes.

5. Parcs et arbres fertilitaires

Il s'agit d'arbres isolés (30 à 100 arbres par ha), préservés lors du défrichement sélectif, sélectionnés parmi les repousses ou plantés, qui rendent des services particuliers : fruits, feuilles nutritives, litière, écorces/médicaments, gousses et feuillages fourragers, bois de chauffe, ombrage, remontées biologiques par les racines, la litière ou les déjections des animaux qui s'abritent à l'ombre. Légumineuses ou non, ces arbres sont connus par la population pour améliorer la fertilité du sol et favoriser la production des cultures sous et alentour de ces arbres (Charreau *et al.*, 1965 ; Dupriez, de Leener, 1993).

* **Karité (*Butyrospermum parkii*)** : produit des fruits et de l'huile en zone de savanes soudanienne (Burkina Faso), cet arbre peut être émondé tous les 8 ans et fournir ainsi du bois de feu et du fourrage d'appoint pour les zébus, en fin de saison sèche (Peltier *et al.*, 2007) .

* **Baobab (*Adansonia digitata*)**, zone soudano-sahélienne du Sénégal au Tchad : feuilles et fruits comestibles, stockage des récoltes de céréales et d'eau (Madagascar).

* **Néré (*Parkia biglobosa*)** (légumineuse) plateau du Burkina Faso, N. Côte d'Ivoire, Mali; zone soudanienne (Roose, 1993), feuilles et gousses fourragères, les graines fermentées fournissent un condiment apprécié en cuisine soudanienne (soubala), fertilitaire.

* **Faidherbia (*Acacia albida*)** (Sénégal, Nord Côte d'Ivoire, Burkina, Niger, jusqu'en Ethiopie) Savane sahéenne semi-aride, feuilles et gousses en saison sèche = fourrages, pas d'ombrage en saison des pluies, fertilitaire (Charreau *et al.*, 1965 ; Peltier, 1994).

* **Cassias (*Senna siamea et Senna spectabilis*)** : zone soudano-sahélienne, usages multiples, mais surtout bois-énergie par émondage de haies (Nord-Cameroun).

* **Tamaris parviflora**; fruits utilisés pour faire une sorte de limonade en zone soudanienne humide (Mali sud, Dupriez, 1993).

* **Palmier rônier (*Borassus aethiopum*)** : sa sève fermentée sert à fabriquer un vin de palme, son bois fendu sert à fabriquer des chevrons résistants aux termites, le germe de la graine est consommé comme légume, les feuilles peuvent couvrir les toits, fabriquer des clôtures et des nattes (zone soudanienne, Côte d'Ivoire). Dans les bas-fonds de la zone sahélienne, le palmier Doum (*Hyphaene thebaica*) joue le même rôle, mais avec une production de vannerie plus importante (Peltier *et al.*, 2008), quoique concurrencée par les produits en plastique importés du Nigeria.

* ***Prosopis juliflora*** : originaire d'Amérique centrale, fertilitaire, savane sèche, (Dupriez 1993), donne un bois de feu mais peut devenir envahissant dans les bas-fonds et sur les sols salés (lac Tchad, Tanzanie).

* ***Erythrina abyssinica*** : fertilitaire des montagnes d'Afrique de l'Est (Dupriez, 1993).

* ***Grevillea robusta*** : Le « chêne soyeux d'Australie », utilisé en agriculture écologique, est largement planté en moyenne altitude au Rwanda et au Burundi ; il fournit du fourrage, du paillis et surtout un bon bois de sciage, (Dupriez, 1993). En Inde centrale, il est associé aux plantations de café arabica. Sur le plateau central d'Haïti, il borde les chemins.

* ***Polyscias fulva*, *Maesopsis eminii*, *Cedrella odorata*, *Grevillea robusta*** + agriculture écologique ont augmenté les rendements des cultures et amélioré les sols (pH, P, K, Ca, Mg), mais diminué l'humus (N + MO) car minéralisation activée (König, 2017).

* ***Guiera senegalensis*** : zone soudano-sahélienne, après la récolte des cultures, les rejets de cet arbuste fixent le sable contre l'érosion éolienne ; puis ils sont coupés avant remise en culture et sont récupérés comme bois-énergie, paillage et fertilisant après la saison sèche (Loupe, 1991, Roose *et al.*, 1993).

* ***Piliostigma reticulatum* et *P. thoningii*** : zone soudano-sahélienne, légumineuse non fourragère. Les branches sont récupérées comme paillage et fertilisant ou haie vive, bon bois de feu, l'écorce sert de liens (Roose *et al.*, 1993).

* **Caïlcedrat (*Khaya senegalensis*), *Ficus sp.*, *Diospiros mespiliformis*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia albida*, *Vitex doniana*, *Acacia polyacantha*, *Anogeissus leiocarpus*, *Terminalia brownii*** : Monts Mandara, Nord-Cameroun, crevasses entre rochers, création de champs en terrasses (Seignobos et Tchotsua, 2017).

* ***Casuarina equisetifolia*, *Prosopis juliflora*, *Simamba glauca*** : versants érodés des collines de Haïti (Brochet *et al.*, 2017).

* ***Populus alba* et *P. nigra*, *Alnus glutinosa*** (espèce non légumineuse dont les racines sont associées à des bactéries fixatrice d'azote), **Frêne (*Fraxinus excelsior*)** (fourrages, bois de

construction et d'artisanat), **fruitiers, noyers, cerisiers, pommiers en Haut Atlas marocain >1000 m d'altitude**, souvent plantés sur lithosols colluvio-alluvionnaires sur les terrasses actuelles, vallées N'fiss, Rhéraya, Ourika, en montagnes semi-arides (Roose et Sabir, 2017)

6. Haies vives arbustives ou herbeuses : terrasses progressives

Montagnes humides: *Leucaena leucocephala*, *Caliandra calothyrsus*, *Tephrosia vogelii (Rwanda, Ndayizigiyé et Madagascar, Ratsivalaka, 2017) ;

***Subéquatorial humide : *Flemingia congesta* , *Gliricidia sepium*;**

***Tropical sec : *Leucaena leucocephala*, *Euphorbia balsamifera*, *Jatropha curcas* (huile carburant). *Citrus aurantifolia*, *Erythrina senegalensis*, *Ziziphus mauritiana* : climat soudano-sahélien, fruits, épineux pour haies de limite de champs, *Moringa oleifera*, *Commiphora africana*, *Prosopis juliflora*, *Acacia ataxacantha*, *A. senegal* et *A. nilotica*.**

****Desmodium*, *Andropogon gayanus/tectorum*, *Pennisetum purpureum*, *Digitaria umfolozi*** pour le renforcement des diguettes et talus en terre (Nord-Côte d'Ivoire, Roose, 1993).

Tropical sec, Haïti : *Euphorbia lactea* et *E. tiruculati (Brochet, 2017)

Sahélien semi-aride: *Opuntia*, *cactus*, *agave*, *amandiers*, *Euphorbia balsamifera

***semi-aride méditerranéen : *Atriplex numularia*, *Medicago arborea*, *Casuarina*, Abricotier sur cordons de pierres : steppe sur sol calcimagnésique en Algérie (Arabi et al. 2017).**

7. Bandes d'arrêt enherbées :

* ***Andropogon gayanus* :** tropical humide, sol ferrallitique, Nord-Côte d'Ivoire, Burkina Faso.

****Pennisetum purpureum* :** tropical soudano-sahélien, plateau Burkina

****Setaria sphacelata*, *S. splendida*, *Pennisetum purpureum*, *Tripsacum fasciculatum* + *Musa sinensis* :** lignes d'arrêt au Cameroun et Rwanda : Ndayizigiye Roose, 1994)

***Bandes d'arrêt « manger » (Haïti) : canne à sucre, ananas, bananiers (Brochet et al., 2017) ; Agaves : fibres , alcool (Mexique : Prat, 2017).**

8. Fixation des ravines

S'il s'agit de petites ravines conservant un peu de sol meuble, il suffit généralement de planter quelques seuils de macro-boutures pour ralentir le ruissellement et accumuler des sédiments. Si le ravinement a entaillé le versant jusqu'à la roche altérée, il faut d'abord stabiliser le fond à l'aide de petits seuils en grillage, en pierres sèches ou en gabions et ensuite planter dans les sédiments des herbes fourragères et des arbres supportant l'excès d'eau en saison des pluies et la sécheresse en saison sèche : par exemple, peupliers, frênes, aulnes en zone méditerranéenne (ex. en Algérie : Roose *et al.*, 2017). Enfin s'il s'agit d'un gros ravin entaillé jusqu'à la roche et qui roule des pierres couvrant tout le fond, il faut d'abord implanter des seuils bétonnés solidement au fond et dans les rives (Lilin & Koohafkan, 1987 ; Brochet, 2017, en Haïti), puis installer un système multi-étagé comportant des bananiers plantains, des cannes à sucre, des cultures vivrières produisant rapidement, des arbres fruitiers (manguiers, arbres à pain, goyaviers, citrus, etc.) et des haies vives de cactus, opuntia et acacias épineux pour défendre les cultures des animaux.

***Montagnes et collines semi-arides méditerranéennes :** *Populus alba*, *Fraxinus excelsior*, *Salix (saules)*, *Alnus glutinosa*, *Eucalyptus camaldulensis* (dans les zones où il ne gèle pas), Lauriers roses, Oliviers, Palmiers dattiers, Noyers, Bambous divers, *Chamaerops humilis*, *Opuntia linguiformis* (figues de barbarie), cannes de Provence.

***Zones tropicales semi-arides :** *Ipomea fistulosa*, *Ipomea triloba* (Lebourgeois et Seignobos, 1995), Vetiver (National Research council, 1993).

9. Discussion et conclusions

*On observe une grande diversité de plantes à retenir en fonction du microclimat et des produits multiples attendus. Il est parfois difficile de choisir entre des plantes fertilisantes, à croissance rapide pour produire de l'énergie et des fourrages et des plantes à croissance plus lente mais résistantes aux dégâts causés par les animaux en parcours libre et par les feux de brousse (chasse, défrichage, imprudences). Il est donc indispensable de tenir compte de l'avis de la communauté des villageois, de l'impliquer dans les projets et d'introduire progressivement des nouveautés qui semblent alléchantes aux techniciens de la LAE : il est nécessaire de faire chaque année une évaluation critique sur la réussite, les écueils et les aménagements à prévoir.

*Plus l'environnement est aride, plus l'implantation de végétaux en milieu dégradé est aléatoire et demande de s'appuyer sur des structures mécaniques légères favorisant l'infiltration des pluies sur les sites où on espère introduire une végétation nouvelle (ex. cuvettes du ZAI, demi-lune, réseau de diguettes et fosses d'infiltration sur les planosols « Hardé » du Nord-Cameroun (Peltier, 2013) ou cordons pierreux (plateaux du Niger, etc.) sur lesquels on installe des lignes de défense arbustives ou arborées).

*En pratique, le choix de l'espèce dépendra aussi de la disponibilité locale en graines, boutures ou plants : les ONG ont souvent un rôle important pour fournir les semences des plantes convenant aux aménagements préconisés et pour lancer des pépinières, après avoir observé d'abord la flore indigène bien adaptée aux conditions locales. Une solution

pragmatique consiste à planter une espèce exotique à croissance rapide, dont on espère un revenu assez rapide, puis à laisser se développer, à son abri, des espèces locales spontanées (herbacées, lianes, arbustes et arbres ligneux) (Tassin, 2019). Le fait d'espérer un revenu à court terme, motive l'agriculteur pour protéger sa plantation contre le feu, le bétail et les plantes invasives ; il pourra ensuite laisser pousser les plantes à usages multiples à croissance plus lente, pour profiter de leurs produits ou services pendant sa vieillesse.

*Dans l'espace cultivé, choisir des espèces à usages multiples, à croissance rapide mais pas envahissantes, à ombrage faible (ou émondées) et faible concurrence en eau et nutriments : prévoir la taille des branches (3 à 5 émondages par an) et des racines superficielles (sous-solage à 50 cm de la ligne de plantation pour favoriser l'enracinement profond). Les émondages servent de fourrage en saison sèche et de paillage en saison des pluies. Il reste à trouver les outils adaptés à l'émondage (sécateurs et pinces locales).

*Les graminées se développent plus vite que les légumineuses et les arbustes, mais elles épuisent les nutriments du sol : après 3 à 5 ans, les touffes s'épuisent et retiennent mal les eaux de ruissellement et les sédiments érodés. Il est déconseillé d'aménager des haies combinées de lignes d'herbes et d'arbustes ou d'arbres (plus lents à installer) car les herbacées ont un impact négatif de longue durée sur la croissance des arbres (König, 2017). Par contre il est conseillé d'associer diverses légumineuses et arbres fertilisateurs pour produire durablement du fourrage pendant que se forment les terrasses progressives.

* Les arbres produisent plus de biomasse que les herbacées : ils redistribuent plus de carbone et de nutriments à la fois au niveau de la litière et des racines et améliorent la porosité du sol et sa capacité d'infiltration en profondeur. Les légumineuses captent l'azote de l'air, mais ont besoin d'un milieu à pH neutre et à phosphore plus disponible : sur les sols acides, l'apport de bases, de phosphate de chaux et de mycorhizes est indispensable pour développer leur capacité de fixer l'azote de l'air (Dupriez et Leener, 1993 ; König, 2017).

* La conservation des sols déjà largement dégradés ne suffit pas aux gestionnaires des terres qui ont besoin d'en tirer les ressources nécessaires à la vie épanouie de leur famille : ils recherchent les moyens techniques de restaurer la productivité de leurs terres et, pour cela, les techniques mécaniques et hydrauliques ne suffisent pas. Seule la définition d'un agrosystème équilibré, comportant des ressources diversifiées et durables pourront convaincre les paysans d'investir dans la santé de leur terre, et de s'inspirer des systèmes forestiers multi-étagés couvrant parfaitement le sol, produisant une grande biomasse dans le sol et à sa surface qui nourrit un nombre impressionnant de microbes, bactéries et champignons utiles à la santé du sol, à la production d'un humus et à la restitution des nutriments. C'est ce sol restauré qui, *in fine*, améliorera la production des cultures et des pâturages.

10. Éléments de bibliographie

Arabi M., Bourougaa L., Kedaid O., 2017. Lutte antiérosive et intensification de l'agriculture en milieu steppique (Algérie). In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » E. Roose Eds., IRD Editions : 625-634.

Azontonde A., 1993. Dégradation et restauration des terres de barre au Bénin.

Cah. ORSTOM Pédol., 28, 2 : 217-226.

Barthès B., Azontonde A., Feller Ch., 2017. Effets du *Mucuna* sur la production et la durabilité de systèmes de culture à base de maïs au Sud-Bénin. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ». E. ROOSE Eds, Editions IRD : 403-414.

Billaz R., 2016. Faire du Sahel un pays de cocagne : le défi agroécologique. L'Harmattan, 280 p.

Boli Z., Diallo Dr., Roose E., 2017. Potentiel du semis direct et des matières organiques pour restaurer durablement la productivité des sols ferrugineux sableux du Nord-Cameroun et du Sud-Mali. In Roose E. Eds « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ». Editions IRD : 367-376.

Brochet M., Clossy S., Lilin Ch., Roose E., 2017. Aménagements hydro-agricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols du bassin du Gros Morne en Haïti. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ». Eds. Roose E., IRD Editions : 565-579.

Charreau C., Vidal P., 1965. Influence de l'*Acacia albida* sur les sols. *Agronomie Tropicale*, 20, 7.

Dubiez E., Freycon V., Marien J-N., Peltier R., Harmand J-M., 2018. Long term impact of *Acacia auriculiformis* woodlots growing in rotation with cassava and maize on the carbon and nutrient contents of savannah sandy soils in the humid tropics (Democratic Republic of Congo). *AgroForestry Systems*, p.1-12.

Duchaufour H., 2017. La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi. In "Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens" E. Roose, IRD Editions: 103-116.

Dupriez H., De Leener, Ph., 1993. Arbres et agricultures multiétagées d'Afrique. CTA, Terre et Vie, 280 p.

Harmand J-M, Balle Pity. 2001. La jachère agroforestière (arborée ou arbustive) en Afrique tropicale. In : La jachère en Afrique tropicale : Rôles, aménagement, alternatives. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances = Fallows in tropical Africa. Roles, management, alternatives. Floret Christian (ed.), Pontanier Roger (ed.), Paris: John Libbey Eurotext, 265-292. ISBN 2-7420-0302-9

Harmand J-M, Forkong Njiti Cl., Bernard-Reversat Fr., Oliver R., Peltier R., 2017. Effets de jachères agroforestières sur la réhabilitation et la productivité de sols ferrugineux tropicaux des savanes soudaniennes du Nord-Cameroun. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » E. Roose Eds, IRD Editions : 117-126.

Ikpe F., Gbaraneh L.D., 2017. Influences de jachères améliorées et pâturées sur le rendement des cultures et les propriétés chimiques des sols ferrallitiques acides dans la

région des forêts humides du S.E. du Nigéria. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. » E. Roose Eds, IRD Editions : 83-92.

Klein H.D., Rippstein G., Huguenin J., Toutain B., Guerin H., Louppe D., 2014. Les cultures fourragères. Ed. Quae, CTA, Presses agronomiques de Gembloux : 262 p.

König D., 2017. Potentialités de l'agro-foresterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » E. ROOSE, IRD Editions: 613-623.

Lebourgeois T., Seignobos C., 1995. Végétations anthropophiles des villages de pasteurs et d'agriculteurs (région du Diamaré, Nord-Cameroun). In: *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 37, 2 : 93-113.

Louppe D., 1991. *Guiera senegalensis* : espèce agroforestière? *Bois et Forêts des Tropiques*, 228 : 41-47.

Lilin CH., Koohafkan A., 1987. Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti. Rapport FAO, Min. Agriculture de Haiti, 36 p.

Neumann I., Egli M.A., Pietrowicz P., 1985. L'arbre et la haie dans l'exploitation paysanne. Projet agro-pastoral de Nyabisindu, Rwanda. Fiche technique n° 3, 91 p.

National Research Council, 1993. Vetiver grass: a thin green line against erosion. Nat. Acad. Press, Washington DC, 170 p.

Ndayizigiye Fr., 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et Méditerranéens » E. Roose Eds, IRD editions : 591-604.

Peltier, R., 1993. Les Terres Hardé, caractérisation et réhabilitation dans le bassin du Lac Tchad. *Cahiers Scientifiques du Cirad-Forêt* n°11, 121 p.

Peltier, R., Eds, 1996. Les Parcs à *Faidherbia*. *Cahiers Scientifiques du Cirad-Forêt*, 12 : 312 p.

Peltier R., Njiti Forkong C., Ntoupka M., Manlay R., Henry M., Morillon V., 2007. Evaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karité du Nord-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* 294, 4 : 39-50.

Peltier R., Serre Duhem C. et Ichaou A., 2008. Valoriser les produits du palmier doum pour gérer durablement le système agroforestier d'une vallée sahéenne du Niger et éviter sa désertification. Revue électronique *Vertigo* La revue en sciences de l'environnement, Vol. 8, no1, 15p. <http://vertigo.revues.org/1452>

Peltier R., Dubiez E., Diowo S., Gigaud M., Marien J-N., Marquant B., Peroches A., Proce P., Vermeulen C., 2014. Assisted Natural Regeneration in slash-and-burn agriculture: Results in the Democratic Republic of the Congo. *Bois et Forêts des Tropiques* 321(3) : 67-79. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_321_67-79.pdf

Peltier R., Bisiaux F., Dubiez E., Marien Jn, Freycon V. , 2017. Agriculture sur brûlis de jachère à acacia sur les sables du plateau Batéké en République Démocratique du Congo. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Eds. E.ROOSE, Editions IRD Montpellier : 127-140.

Prat Ch., Palacios A.M., Patron E.R., 2017. Restauration de sols volcaniques par plantations d'agaves, d'herbes et d'arbres. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et Méditerranéens » E.Roose Eds., IRD Editions : 535-546.

Razafindrakoto M.A., 2017. Influences de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar). In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » E.Roose Eds, IRD Editions : 93-102.

Roose E., Ndayizigiye Fr., Sekayange L., 1993. L'agroforesterie et la GCES au Rwanda. *Cah.Orstom.Pédol.*, 28, 2 : 327-350.

Roose E., Kabore V., Guénat C., 1993. Fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées : le zaï en régions soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahier Orstom Pédol.* 28, 2 : 159-173.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédol. FAO*, Rome 420 p.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie. IRD Editions, Montpellier, 713 p.

Roose E., Sabir M., 2017. Restauration des basses terrasses dévastées par les torrents dans le Haut Atlas (Maroc). In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et Méditerranéens » E. Roose Eds., IRD Editions : 547-554.

Seignobos Ch., Tchotsoua M., 2017. Création de champs cultivés en terrasses dans les Monts Mandara et réhabilitation des vertisols dans la plaine du Diamaré (Nord-Cameroun). In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » Eds. E.Roose, IRD Editions : 467-481.

Tassin J., 2019. Arbres évadés : du marronnage au compagnonnage. *Jardins de France*. N° 653 : 55-57.

Chapitre 17

Capture du ruissellement et restauration de la productivité des sols au bassin versant de Gros Morne en Haïti

M. BROCHET, Saintil CLOSSY, Ch. LILIN, E. ROOSE

Courriels: mibrochet@wanadoo.fr, clossying@yahoo.fr, charles.lilin@free.fr, eroose2017@gmail.com

1. Introduction

Haïti, soumise à une forte orogénèse, a connu depuis longtemps divers problèmes d'érosion exacerbée par les cyclones, les tremblements de terre, les pentes fortes des collines, la pauvreté des paysans, la pression démographique, le surpâturage et le défrichement. Aussi de nombreux projets de protection environnementale se sont succédés pour tenter de stabiliser les versants, de réduire les inondations tout en injectant des revenus en milieu rural. L'érosion des terres étant considérée comme un sous-produit de la pauvreté et de l'absence de développement dans les collines, la volonté de la traiter se traduit dans les projets par la priorité donnée à des aménagements physiques qui doivent à la fois maîtriser l'érosion et améliorer la production agricole. Elle conduit aussi à y associer des actions d'accompagnement visant à faciliter le développement agricole (pistes, citernes, marchés, produits d'exportation). Malgré ces intentions louables, la réalité des projets de conservation des eaux et des sols est souvent décevante pour qui ne se contente pas de leurs évaluations officielles, mais fait le point sur le terrain quelques années après qu'ils soient terminés. Les projets de lutte antiérosive sont considérés par les paysans avant tout comme une ressource immédiate de salaires plutôt qu'un investissement à long terme pour leur terre : d'où leur manque d'entretien (Bellande, 2007).

Ce chapitre décrit le projet de développement agricole durable de Gros Morne qui relève de la gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols (GCES) (Smolikowski, 1993 ; Roose, 1987-94 ; Brochet, 2003-2012). Il privilégie l'amélioration durable de la disponibilité en eau et de la production agricole des vallons frais. Dans une première phase, au lieu de tenter de supprimer la source du ruissellement en stabilisant les versants, ce projet a choisi de gérer l'eau et la fertilité des sols dans les « fonds frais » (=vallons) et de capter les sédiments fertiles et une partie du ruissellement derrière de solides seuils en moellons cimentés, imperméables en vue d'y développer une agriculture intensive (cultures associées et irrigation) et durable sous un canevas d'arbres fruitiers, de canne à sucre, de bananiers et de haies vives qui rappelle en quelque sorte « un oasis linéaire » (Roose, 1994). Dans une deuxième phase, ce projet donne une place importante à la stabilisation des versants des ravines : haies vives pour maîtriser le bétail, des cultures pérennes comme la canne à sucre, des bananiers et les arbres fruitiers sur les bas de versants colluviaux, des arbres, des citrus, des taillis et des cultures fourragères sur les versants plus secs (Brochet, 2012). Nous évoquerons les conditions de la mise en œuvre de ces aménagements ainsi que quelques uns des problèmes techniques rencontrés.

2. Les aspects techniques du projet de Gros Morne

Le projet de développement agricole durable de Gros Morne a trois axes d'intervention principaux :

- *La construction de seuils maçonnés et de leurs annexes (puits, bassins, citernes) dans des ravines moyennes à fond plat (appelés fonds frais);
- *L'arboriculture fruitière : surgreffage des manguiers, plantation d'arbres fruitiers sur les bonnes terres et de taillis sur les pentes les plus fortes et les sols pauvres ;
- *La mise en œuvre de techniques biologiques dans les ravines (haies vives) et sur les versants (embocagement).

Ces interventions sont complétées par des actions d'accompagnement :

- *La mise en place de pépinières ;
- *Le développement de cultures associées rentables à court terme ;
- *La formation de greffeurs, d'agriculteurs et de techniciens ;
- *Les activités d'éveil à l'environnement pour les enfants des écoles et le planning familial.

2.1. Les seuils en maçonnerie et en gabion

A Gros-Morne, le projet de SOS ESF2 a aménagé des ravines moyennes pour créer des oasis linéaires d'humidité et de fertilité (fonds frais) et pour constituer des réserves d'eau de ruissellement en vue d'arroser les cultures maraîchères et d'abreuver le bétail.

Une priorité : améliorer la disponibilité de la ressource en eau

Sur un bassin de 49 hectares, onze seuils imperméables en gabions ou en maçonnerie de gros blocs avec mortier au ciment ont été construits dans des ravines là où les ressources en eau étaient critiques pour les exploitants en fin de saison sèche. L'eau est le facteur principal qui limite l'intensification agricole et le développement du vivrier maraîcher (bananier, patate douce, malanga, gombo, légumes feuilles) comme de l'élevage.

Certes, ces seuils retiennent aussi des sédiments et participent à la maîtrise du ravinement, mais il s'agit d'effets d'une importance assez modeste en face des sapements de berges. L'effort du projet porte surtout sur l'amélioration du niveau de la production agricole (Roose et al., 2000). Il crée les conditions pour une diminution de la pression agricole sur les versants et pour la mise en place d'autres aménagements, en élargissant la panoplie des choix techniques.

En Haïti, ces techniques s'inspirent de réalisations paysannes comme les seuils en terre construits pour créer des « lagon », zones aplanies créées en fond de talweg utilisées pour la culture du riz. La construction de tels ouvrages est rapide et utilise des moyens modestes en outillage, mais leur fragilité nécessite de fréquentes interventions pour réparer les dégâts provoqués par des crues. Les seuils en maçonnerie construits par le projet de développement de Gros Morne s'inspirent

également des petites infrastructures d'hydraulique de montagne réalisées par les agriculteurs dans les Cévennes (France méridionale) et au Cap Vert.

Les seuils en maçonnerie ont deux objectifs principaux :

*Ils accumulent des sédiments riches en matières organiques dans le fond de la ravine traitée et infiltrent une partie des eaux de ruissellement. Ils restaurent ainsi la fertilité des fonds frais pour y reconstituer des micro-milieus humides, propices à la plantation d'espèces à forte valeur ajoutée telles que le bananier, le malanga, l'igname ou des arbres fruitiers. Il s'agit d'un investissement productif dont les bénéfices pour l'agriculteur apparaissent rapidement et persistent dans la durée.

*Ils mettent à la disposition des agriculteurs une réserve en eau pour l'arrosage et l'abreuvement du bétail : quelques dizaines de m³ dans les bassins et quelques centaines de m³ entre les sédiments accumulés en amont des seuils. Pour faciliter l'utilisation de l'eau retenue, les seuils ont parfois été complétés par des bassins de dissipation situés en aval ou par des puits creusés dans les alluvions retenues par les seuils.

Les seuils sont construits là où les conditions sont favorables (accès, proximité d'une aire résidentielle, négociations fructueuses avec les agriculteurs concernés, tenure foncière peu conflictuelle). Des ravines moyennement pentues (<30%) ont été privilégiées, car le volume d'eau stocké y est plus important et le risque de destruction par affouillement est moindre. Des critères économiques ont été pris en compte afin de retenir des sites où les seuils pourront efficacement supprimer un frein à l'augmentation de la production agricole.

Des seuils destinés à durer

Le soin apporté à la conception et à la construction des ouvrages mis en place à Gros Morne doit leur assurer une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Ils sont prévus pour résister aux crues exceptionnelles : leur bonne résistance aux crues centennaires liées aux cyclones de septembre 2008, donne des garanties en ce qui concerne leur longévité.

La solidité des ouvrages résulte aussi de l'attention apportée au choix des sites : recherche d'une section rétrécie de la ravine, la roche-mère étant si possible située à faible profondeur, afin de bien ancrer le seuil. La maçonnerie a été remplacée par du gabion lorsque ces conditions n'étaient pas réunies (lit entre 30 et 50 m. et/ou roche-mère à grande profondeur). L'identification de sites propices pour la construction des seuils demande beaucoup de temps, de dialogue avec les riverains et ne peut se faire qu'en saison sèche, quand la végétation est peu développée. Pour ces aménagements, les débats techniques, au sein de l'équipe du projet ou avec des experts extérieurs, ont été permanents. Ils portent sur des aspects conditionnant la solidité de l'ouvrage (dimensionnement, importance des fondations et des ancrages, prise en compte des risques de contournement, de renardage, d'affouillement, etc.). Ils portent aussi sur les techniques destinées à améliorer la valorisation agricole du seuil : utilisation d'une chape de mortier pour créer une surface de séchage sur les gabions, escalier facilitant le franchissement de l'ouvrage, construction d'un puits dans les alluvions retenues et d'un bassin de dissipation en aval, ce dernier permettant aussi de stocker de l'eau.

Les avantages comparatifs des seuils en maçonnerie

Les seuils en maçonnerie construits à Gros Morne peuvent être comparés aux seuils en pierres sèches ou en gabions construits dans les ravines par d'autres projets ayant comme objectif principal la maîtrise de l'érosion.

Ils se distinguent d'abord de ces derniers par leur finalité, qui est d'améliorer directement et rapidement la production agricole grâce à l'eau retenue derrière le seuil imperméable, dans les bassins de dissipation ou dans les alluvions accumulées. Ils se distinguent aussi des seuils construits habituellement dans les ravines par leur solidité, car ils sont prévus pour résister aux crues, même en l'absence d'entretien. En Haïti, les seuils en pierres sèches, ayant pour objectif de maîtriser l'érosion, ont en règle générale une durée de survie courte là où le ravinement est actif. La maçonnerie en pierres sèches ne permet à l'ouvrage de résister, ni au piétinement du bétail, ni à des crues importantes, surtout lorsque les pierres utilisées ont de faibles dimensions. La réalisation des seuils en gabions est souvent déficiente. Ainsi, la plupart de ces seuils n'ont d'effets importants et durables ni sur la production agricole, ni sur le ravinement.

Les seuils en maçonnerie construits à Gros Morne peuvent aussi être comparés avec les retenues collinaires dont l'objectif principal est de créer des réserves d'eau pour l'irrigation des plaines en aval et pour l'abreuvement du bétail. Les premières évaluations disponibles sur de tels aménagements construits sur le Plateau Central montrent un retour sur investissement faible (Y.A. Maïga et Amadou DIENG, 2003). Une surface agricole importante (souvent les meilleures terres) est noyée par la retenue et surtout, les difficultés rencontrées pour mettre en place une gestion collective de l'eau d'irrigation qui soit efficace, réduisent considérablement l'intérêt des retenues collinaires. Celles-ci ne devraient être envisagées que lorsque les conditions sociales permettent la mise en place d'institutions locales performantes (Ostrom, 1992).

Les effets positifs des économies d'échelle permises par les retenues collinaires sont en partie gommés par la sous-utilisation de l'eau stockée. Les surfaces irrigables situées en aval de la retenue sont souvent insuffisantes et mal organisées. Des motopompes permettent d'irriguer des zones situées plus en amont, mais elles sont coûteuses à l'achat comme en frais de fonctionnement. Par ailleurs, leur entretien est aléatoire, ce qui constitue un facteur de risque pour les cultures irriguées (Y. A. Maïga et A. DIENG, 2003). L'aménagement de la ravine de Bois Scié à Gros Morne (11 seuils et 3 puits) a coûté 35 700 €uros en 5 ans pour une capture de 5 épisodes pluvieux, soit 194 m³ d'eau dans les citernes et 3150 m³ dans la nappe comprise dans les sédiments en amont. Plus de 50% de cet investissement ont été versés aux paysans coopérant au projet. Un petit barrage collinaire revient bien plus cher (de 0,5 à > 1 million d' €uros) : il est généralement réalisé par des entreprises étrangères et il faut ajouter les coûts sociaux dûs à l'inondation des meilleures terres des vallées et au déménagement des familles qui en vivaient (Brochet, 2012). Enfin, l'eau stockée en amont d'un barrage est soumise à une évaporation potentielle de l'ordre de 1500 mm/an perdus pour la production des plantes tandis que l'eau stockée dans le sol en amont des seuils est évapotranspirée par les cultures à un débit plus réduit que l'eau libre (ETR < ETP) et les nutriments emportés sur les versants par le ruissellement sont récupérés par les cultures en aval.

17.2.2. Arboriculture fruitière

Le surgreffage des manguiers

Les aménagements dans les ravines sont associés à d'autres actions visant à améliorer la production agricole, en particulier le surgreffage des manguiers de la variété « Mango fil » dispersés sur les versants. Ceux-ci sont bien adaptés aux sols rencontrés, souvent superficiels, mais leurs fruits ne sont pas appréciés sur le marché international. Leur surgreffage avec la variété « Francique » permet de tirer profit de leur rusticité et d'obtenir dans un bref délai (3 ans) des fruits faciles à commercialiser aux USA, ou la variété « Jean-Marie » en République Dominicaine, ou des variétés plus précoces bien appréciées sur les marchés d'Haïti.

Le projet de développement de Gros Morne a surgreffé plus de 10 000 **manguiers**. Il a aussi détaillé les opérations nécessaires (prélèvement et préparation des greffons, réalisation de la greffe en fente, conduite des arbres après la greffe, etc.) et des actions de formation-action ont transféré les compétences pratiques à des greffeurs locaux. Le volet « surgreffage » du projet a permis de toucher directement 2 500 agriculteurs et d'ouvrir un dialogue portant sur leur propre perception des problèmes.

La plantation d'autres arbres, fruitiers ou forestiers

Le projet de Gros Morne a incité les agriculteurs bénéficiant d'un seuil à planter des arbres fruitiers, en fonction de leurs besoins en eau et de la protection assurée par les haies vives entourant certaines parcelles afin d'empêcher l'intrusion du bétail. Dans les fonds frais ont été plantés des **arbres à pain, manguiers, cocotiers, bananiers plantains** ; des **avocatiers** en bas de versant, dans les colluvions les plus fertiles et bien drainées, (à protéger contre la dent des chèvres). Des manguiers ont été plantés dans la partie moyenne des versants ainsi que des **citronniers** plus haut, là où les sols plus superficiels sont moins bien alimentés en eau.

Quant aux pentes les plus raides, aux sols pauvres ou caillouteux, il est proposé d'améliorer les pâturages pour le bétail (*Panicum maximum*, *Pennisetum purpureum*, etc) ou de planter des taillis de bois campêche (*Haematoxylon campechanum*), *Cassia siamea*, fresne (*Simamba glauca*), *Casuarina equisetifolia*, *Prosopis juliflora* en vue de produire des perches, des poutres et du charbon de bois tous les cinq ans (très rentable).

L'amélioration de la production de la culture de la canne à sucre

Le projet a prévu d'améliorer la production de la culture de cannes à sucre en levant la contrainte constituée par la vétusté des moulins. Cette culture est non seulement intéressante sur le plan économique (payer l'école), mais également du point de vue de la maîtrise de l'érosion. En effet, une plantation de cannes dure plusieurs années et elle protège très bien le sol. En fond de ravine, elle freine les écoulements et s'oppose au creusement lors des crues.

La trame des seuils, des haies vives, des arbres et des cultures pérennes produisant à l'abri des arbres fruitiers, constitue un oasis linéaire stabilisant les axes de drainage du paysage de collines, réduisant les crues et les transports solides qui envasent les retenues et les villes en aval.

2.3. Les aménagements biologiques

Afin de tirer profit des nouveaux fonds frais, les agriculteurs font des efforts pour clôturer avec des haies vives les espaces aménagés. Ainsi, l'investissement réalisé a déclenché des travaux d'embocagement et le projet a accompagné cette dynamique.

Une enquête sur les savoirs paysans

Le projet a conduit une enquête portant sur les techniques paysannes de création et de gestion des haies vives entourant souvent les parcelles cultivées. Elles sont surtout à base de candélabres (*Euphorbia lactea* et *E. tiriculati*) et ont pour fonction de protéger les cultures contre l'intrusion du bétail. Là où une telle haie de clôture traverse une ravine, elle constitue de fait un seuil biologique sommaire, même si, en l'absence de filtre, ce dernier accumule peu de dépôt de sédiments en amont. Ces haies sont régulièrement taillées pour limiter leur développement : la décomposition de leurs résidus libère des éléments minéraux, notamment de la potasse. Les haies améliorent ainsi la fertilité du fond frais. Ces sortes de « seuils perméables » ont assez bien résisté aux crues provoquées par les quatre cyclones de septembre 2008 et les agriculteurs ont spontanément colmaté les brèches ouvertes en y plantant du candélabre (*Euphorbia lactea*) et des macroboutures de gommier (*Bursera simaruba*).

La construction expérimentale de seuils biologiques

En s'appuyant sur l'observation de telles réalisations paysannes, le projet a entrepris de compléter la construction de seuils maçonnés par des seuils biologiques situés en amont des premiers, en prévoyant la mise en place d'un filtre pour créer des terrasses planes plus faciles à irriguer. Il a utilisé des espèces diversifiées présentant divers intérêts : alimentaire, fourrager, mellifère et pour la production de bois. L'appropriation des tels ouvrages par les agriculteurs impliqués constitue un pari que le projet devrait pouvoir gagner. En l'absence d'une gestion effective des seuils biologiques par les agriculteurs, en particulier pour colmater les brèches et entretenir le filtre, leur survie est en effet problématique, alors que les seuils en maçonnerie sont dimensionnés pour pouvoir supporter une absence d'entretien.

Là où, du fait du creusement de son lit, la ravine coule sur la roche-mère, la création de tels seuils biologiques devra s'étaler dans le temps. Dans une première phase, un seuil en pierres sèches temporaire ou un seuil s'appuyant sur des boutures implantées sur les deux rives permettra d'accumuler des alluvions. Une fois un premier dépôt constitué, il sera possible d'y planter les macroboutures destinées à constituer le seuil biologique définitif (Lilin et Koohafkan, 1987).

Par contre, les seuils biologiques constituent un obstacle à la circulation à l'intérieur de la parcelle cultivée, le long de la ravine. Le projet devra aider les agriculteurs à créer des itinéraires de contournement des seuils biologiques.

Créer des haies par consolidation des rampes de pailles sur les versants

Sur des versants cultivés, les agriculteurs construisent souvent des « rampes paille » utilisant les résidus de récolte provenant du nettoyage de la parcelle. Ces rampes sont provisoires et ont un effet négligeable sur l'érosion. A Gros Morne, le projet a financé leur renforcement par la plantation de boutures de *Gliricidia sepium* (lilas étranger) et par le semis de benzolive (*Moringa oleifera*). Ce renforcement rendra les rampes pérennes. Les haies vives ainsi constituées améliorent la production

agricole et diminuent l'érosion. Le fait de partir d'une technique traditionnelle pour la faire évoluer devrait ici aussi augmenter les chances de voir les agriculteurs s'approprier cette technique innovante (Koohafkan et Lilin, 1989).

Les perspectives d'avenir

S'inspirant de techniques paysannes validées en Haïti et valorisant un matériel végétal d'une diversité exceptionnelle, les techniques biologiques présentent probablement un potentiel important pour créer des fonds frais fertiles en améliorant leur production agricole, pour restaurer une certaine diversité biologique, pour traiter le ravinement et pour cloisonner les versants (embocagement). Pour gagner le pari que constitue leur diffusion, le projet a privilégié une introduction prudente et progressive, en complément de techniques pour lesquelles la demande paysanne est plus évidente, comme les seuils en maçonnerie, les bassins et les puits. En effet, l'eau stockée par ces derniers réduit le ravinement et les risques liés aux irrégularités climatiques pour les cultures pluviales, ce qui est très apprécié. La contrainte forte que constitue la pénurie d'eau pour l'arrosage et pour l'abreuvement du bétail est clairement perçue par les agriculteurs.

Maintenant que les paris relatifs à la durabilité de ces seuils en maçonnerie sont en bonne voie d'être gagnés, le projet entre dans une phase où la diversification des techniques utilisées passe au premier plan et où il faut répondre à de nouveaux défis. En particulier valoriser l'eau disponible pour l'irrigation en apportant des compléments d'engrais minéraux en particulier N et P.

3. Les aspects non-techniques du projet de Gros Morne

Si nous voulons que les projets de GCES formulés en Haïti tirent profit de l'expérience du projet de Gros Morne, il faut analyser quelques innovations moins évidentes mises en œuvre par ce dernier.

3.1. Un travail artisanal, des aménagements « sur mesure »

Un intérêt majeur de ce projet est lié à la mise en œuvre d'une démarche que l'on peut qualifier d'artisanale et qui a permis de définir des aménagements « sur mesure », finement ajustés aux sites et bénéficiant d'un retour d'expérience en temps réel. A l'inverse, la recherche d'économies d'échelle conduit la majorité des projets de CES à adopter une démarche que l'on peut qualifier d'industrielle, au détriment d'un ajustement fin de chaque aménagement aux conditions d'un site et d'une valorisation réelle du retour d'expérience (Lilin, 2009).

3.2. Une disponibilité importante

La familiarisation avec les paysages, la recherche de sites possibles, puis les négociations avec les agriculteurs et le suivi des chantiers ont demandé une disponibilité importante au « maître artisan ». Les techniciens qui ont suivi le projet en étant sur place de façon permanente ont peu à peu pris sa relève, au fur et à mesure que leur formation par compagnonnage a progressé. Les esprits pessimistes pourraient en déduire qu'un tel projet ne serait pas répliquable ailleurs en Haïti, vu la rareté d'agronomes et d'ingénieurs civils possédant de telles qualifications et une telle disponibilité.

3.3. La qualité du leadership et du suivi

Le projet de Gros Morne a bénéficié d'un leadership efficace. Son pilotage a été facilité par sa taille modeste, mais aussi par le sens du terrain, le charisme et la disponibilité de l'agronome responsable de sa formulation et de son suivi et des compétences complémentaires du réseau mobilisé. Grâce à ce leadership, le suivi des réalisations a été bien assuré et la circulation de l'information fut bonne. L'utilisation intensive de la photo numérique et de l'orthophotoplan a facilité un retour d'expérience efficace et a permis d'impliquer un comité de pilotage dans les débats techniques.

3.4. Une intervention évoluant par itérations successives

Comme déjà évoqué, les attentes paysannes concernant un nouveau projet sont formatées par les projets de conservation des sols antérieurs ; la « mémoire des projets » ainsi construite conduit à une « langue de bois » paysanne. La « demande paysanne » est en grande partie déterminée par les spéculations sur les bénéfices immédiats (en particulier sous la forme de salaires) procurés par la réalisation de divers aménagements.

Le déroulement dans le temps du projet de Gros Morne a été pensé comme une succession de paris. Une conscience aigüe des risques de dérive liés à des paris irréalistes ou prématurés a stimulé un intérêt quasi obsessionnel pour le suivi des aménagements et le retour d'expérience.

4. La restauration de la productivité des sols

On peut regretter que le projet de développement durable de Gros Morne n'ait pas disposé de moyens de recherche, ni d'analyses systématiques des sols dégradés du départ et des sols restaurés après la fin du projet. Par contre, les observations de terrain et les rapports annuels de suivi montrent bien à quel point, les surfaces dégradées du petit bassin versant (1 km²) profitent des apports de ruissellement des sédiments riches en MO (> 1 m devant les seuils, en trois ans), et des apports de fumier et des résidus de cultures intensives associées aux arbres. Une fois les fonds de ravines stabilisés, on peut protéger les versants par la formation d'un bocage forestier sur les terres les plus pauvres, par des prairies pérennes sur les fortes pentes et un système agro-forestier fruitier sur les bas de versants.

Les sols étant améliorés et l'alimentation hydrique assurée, on peut compter sur de nouvelles cultures apportant des revenus à différentes échelles de temps : maraîchage produisant en 4 mois, patates douces à 6 mois, banane plantain à 8-10 mois, canne à sucre à 12-24 mois, manguiers greffés à 3 ans, autres fruitiers à 4 -10 ans, bois de feu et charbon de bois à 5 ans. Mangues, canne à sucre et charbon de bois servent à payer les principales factures d'inscription des enfants à l'école. Globalement, la production a été multipliée par trois (Brochet et al., 2012)

Par ailleurs, l'aménagement des fonds de ravines ralentit les crues lors des averses cycloniques et protège les plaines et villes des inondations brutales et de l'envasement des barrages. La capture des eaux de ruissellement dans les bassins (3151m³+ 200m³ dans les bassins X 5 épisodes de grosses averses) correspond à environ 16500m³ utilisables pour l'irrigation et l'abreuvement du bétail : c'est un volume modeste, mais le principal effet de cet

aménagement est d'étaler les crues et de réduire sa force de cisaillement et de transport des sédiments provenant de la dégradation des berges.

Le coût de ces aménagements est relativement modeste (11 seuils + 3 bassins dans le bassin versant de Ti Acrête = 35.700€/ 49 ha en cinq ans dont 50 % reviennent aux paysans (salaires et fournitures) : contrairement aux barrages collinaires, il n'y a pas de coût sociaux, mais la formation progressive à de nombreux métiers artisanaux indispensables pour l'extension de tels projets.

Evolution des rendements dans les fonds frais aménagés

- Amélioration du rendement des cultures
Les récoltes de maïs, sorgho, pois d'angole, patates douces et manioc sont multipliées par 3 sur les surfaces qui ont accumulé 20 à 30 cm de limon et des débris organiques : pailles, feuilles et déjections animales. Par exemple, le rendement en maïs passe de 6 à 18 quintaux/ha.
- Introduction de nouvelles cultures à plus forte valeur ajoutée.
Les résultats les plus significatifs proviennent de l'introduction de nouvelles cultures ayant une valeur ajoutée brute (VAB) par unité de surface plus importante que les associations de cultures précédemment pratiquées.
- Dès que les agriculteurs disposent de plants, ils installent dans le fond frais des bananiers plantains, dont la culture produit la plus haute VAB ;
- Ils introduisent également des cultures maraîchères : gombo, amarante, piment, papaye, ...
- enfin, quand la ressource en eau est suffisante grâce à un puits creusé dans les terrasses alluviales, ils font une culture de haricot (*Phaseolus vulgaris*), de décembre à mars, produisant ainsi une ressource de protéine appréciable.

Amélioration des capacités à implanter des « cultures de primeur » après des accidents climatiques.

Au passage des pluies cycloniques, il peut y avoir submersion du fond frais pendant quelques jours et destruction de la culture en place. Cependant, les sols ne sont pas emportés et dès qu'ils sont ressuyés, les agriculteurs peuvent les mettre rapidement en culture et espérer des récoltes, dans des délais de 2 mois pour les cultures de « légume feuille », comme l'amarante et lalo (*Corchorus olitorius* L) et dans un délai de 3 ou 4 mois pour les patates douces.

Les « cultures de primeur » des fonds frais complètent efficacement les premiers secours d'aide alimentaire. Ainsi, l'aménagement des fonds frais avec des structures durables est un élément de réponse au contexte d'insécurité alimentaire chronique et conjoncturelle.

5. Conclusions

Le contexte actuel en Haïti est caractérisé par une forte dégradation des ressources et une grande pauvreté. Mais un autre aspect est tout aussi important. Depuis plus d'un demi-siècle, les projets de conservation des sols se succèdent dans ce pays, accompagnés de débats méthodologiques et de propositions souvent intéressantes.

Au lieu de s'attaquer aux « terres finies » sur les collines, ce projet de développement durable a d'abord concentré ses efforts sur la stabilisation des fonds de ravines moyennes pour y capter le ruissellement et les sédiments, y développer derrière des seuils solides des sols fertiles et bien irrigués, un réseau biologique, des systèmes de cultures intensives et rentables à courte échéance et des cultures pérennes (arboriculture fruitière et cannes à sucre).

Ce système a fait ses preuves en résistant aux cyclones tout en introduisant plusieurs cultures rentables à diverses échéances. Il a aussi réduit les crues et les inondations dans les plaines cultivées en aval. Aujourd'hui, ce fond frais restauré a une forte production de biomasse et ressemble à « un oasis linéaire » où les paysans, les techniciens agricoles et les experts ont développé une méthodologie appliquée à des petits bassins, à des communautés humaines limitées qui, grâce aux concertations, ont réussi à tirer les conclusions de chaque événement et à adapter les aménagements en fonction des conditions locales.

Les perspectives de développement rural durable sont encourageantes : mais la route est encore longue pour réduire la pauvreté, maintenir la fertilité continue des parcelles, développer la production fourragère en vue d'un élevage intensif producteur de fumier, améliorer le réseau routier, organiser la valorisation des produits sur le marché national et international et former des équipes de techniciens capables d'étendre cette approche sur l'ensemble des terres dégradées des montagnes d'Haïti.

Bibliographie

- ***Brochet M., 1993.** Les stratégies de lutte contre l'érosion et l'aménagement des bassins versants en Haïti. *Revue Tiers Monde*
- ***Brochet M., 2012.** Atelier aménagement des Bassins Versants, Gros Morne : 101 p.
- ***Bellande A., 2007.** Impact socioéconomique de la dégradation des terres en Haïti et interventions pour la réhabilitation du milieu cultivé. UNDP-Ministère de l'Environnement.
- Bellande A., 2008.** Déboisement et reboisement en Haïti : quelques éléments pour comprendre et agir. *Revue Conjonction Institut Français, Port au Prince, Haïti.*
- Guito R., 1999.** Manuel pratique de CES d'Haïti. Centre de Formation en Aménagement Intégré des Mornes, Limbé, MARNDR et Coop. Française:133 p.
- ***Koohafkan A., Lilin Ch., 1989.** Arbres et arbustes d'Haïti. Utilisation des espèces ligneuses en conservation des sols et en aménagement des bassins versants. FAO-MARNDR, 133 p.
- ***Lilin Ch. et Koohafkan A., 1987.** Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti. MARNDR et FAO, 36 p.
- ***LILIN Ch., 2009.** Du Nord au Sud : prudence dans la gestion des projets. *Revue Gérer et Comprendre (Annales des Mines), N° 95.*
- ***Maiga Y., Dieng A., 2003.** Diagnostics des systèmes de cultures et d'élevage dans la zone de Papaye : premiers résultats des retenues collinaires de Bassin Bœuf et Lorobe. CNEARC, mémoire ing. ESAT, Montpellier, 65 p.
- Murray G. F., 1979.** Terraces, trees and the Haitian peasants : an assessment of 25 years of erosion control in rural Haiti. USAID,

Ostrom E., 1992. Pour des systèmes irrigués autogérés et durables : façonner les institutions. Traduit et résumé par Philippe Lavigne-Delville (GRET). Titre original : *Crafting institutions for self-governing irrigation systems*. ICS Press,

***Roose E., 1987.** GCES dans les paysages d'Afrique occidentale. Stratégies classiques et nouvelles. In : *Soil, Crop, Water management systems for rainfed agriculture in semi-arid zone*. Proceedings ICRISAT, Niamey : 55-71.

***Roose E., 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO*, Rome, n° 70, 420 p.

***Roose E., Chebbani R., Bourougaa L., 2000.** Ravinement en Algérie: typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* 11, 4 : 317-326.

SACAD et FAMV, 1994. Paysans et paysages en Haïti. Travaux sur l'agraire haïtien. Tome III : *Dynamique de l'exploitation paysanne*. Editeur SACAD et FAMV Port au Prince, 476 p.

***Smolikowski B., 1993.** La GCES, une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en Haïti. Cas du transect Petite Rivière de Nippes – Salagnac – Aquin dans le sud d'Haïti. *Cah. Orstom Pédol.*, 28, 2 : 229-252.

USAID, 2007. Environmental vulnerability in Haiti.

Chapitre 18

Ruissellement, érosion et pollution d'un sol brun volcanique sous cultures industrielles : effets de la pente et des résidus de culture en Martinique.

Khamsouk B., Roose E., Dorel M.

1. Introduction

En Martinique, une île volcanique tropicale de l'archipel des Petites Antilles dans les Caraïbes, les productions industrielles d'ananas, de bananes et de sucre de canne, qui s'étendent sur près de 10 000 ha (40 % de la SAU), constituent un atout économique et social majeur. Mais ces productions agricoles intensives exigent beaucoup d'engrais et de pesticides : elles ont donc un impact sur l'environnement et leurs effets peuvent être d'autant plus nuisibles que leurs zones de culture sont situées sur des collines très pentues, à proximité des habitations sur une île très peuplée (365 hab/km²) et que l'île connaît des saisons des pluies particulièrement arrosées (pluie de 500 à >2500 mm/an, avec une période de cyclones).

Face à cette problématique à la fin des années 1990 et avant la crise sanitaire liée à la pollution des sols au Chlordécone, un dispositif expérimental a été installé dans la plantation bananière « Rivière Lézarde » du CIRAD en région centrale de l'île afin de mesurer les effets de ces cultures industrielles sur l'environnement, à savoir le ruissellement, l'érosion, le drainage et la pollution chimique des eaux. Après deux années consécutives de mesures en conditions naturelles, on a simulé des pluies exceptionnelles qui ont confirmé les résultats remarquables observés sous pluies naturelles.

2. Site et méthodes d'étude

La plantation « Rivière Lézarde » du CIRAD se trouve à 20 km NE de Fort-de-France sur un sol argileux brun rouille à halloysite, sur un relief accidenté de collines parcourues de ravins encaissés : les bananeraies occupent des versants de 7 à 40 % de pente. Le climat est tropical humide, caractérisé par des températures moyennes mensuelles de 22° à 29°C et une forte pluviosité de 2200 à 2500 mm/an. Sur trois pentes de 10, 25 et 40 %, dix parcelles « d'érosion » (100 à 200 m²) ont été installées capables de stocker le ruissellement de pluies cycloniques, ainsi que cinq lysimètres non remaniés, cônes posés vers 60 cm de profondeur sous un bananier (voir fig.18.1 et 2).

Nous avons retenu les systèmes de cultures suivants pour les dix parcelles d'essai.

*Le **sol nu** est un traitement témoin pour déterminer la résistance du sol à l'énergie des pluies. Le sol dénudé est labouré sur 20 cm de profondeur, puis sa surface est égalisée avant que débute la campagne de mesures. Trois inclinaisons ont été retenues : 11%, 25% et 40%. Il y a donc trois parcelles de sol nu de 100 m², dénommées respectivement **Nu11**, **Nu25**, **Nu40**.

*La **bananeraie établie** est un état cultural du système de production âgé d'au moins deux ans, avec des résidus organiques issus du cycle de culture. Dans une parcelle de bananeraie établie à densité de plantation courante (1800 pieds/ha), deux parcelles de 200 m² **Ba9** et **Ba11** sont établies respectivement sur des pentes voisines de 9% et 11% (voir figure 1). Sur ce traitement, aucun travail du sol n'est réalisé et les résidus organiques sont réorganisés en bandes perpendiculaires à la pente, une pratique de lutte antiérosive efficace et déjà démontrée au Burundi (Rishirumuhirwa, 1997).

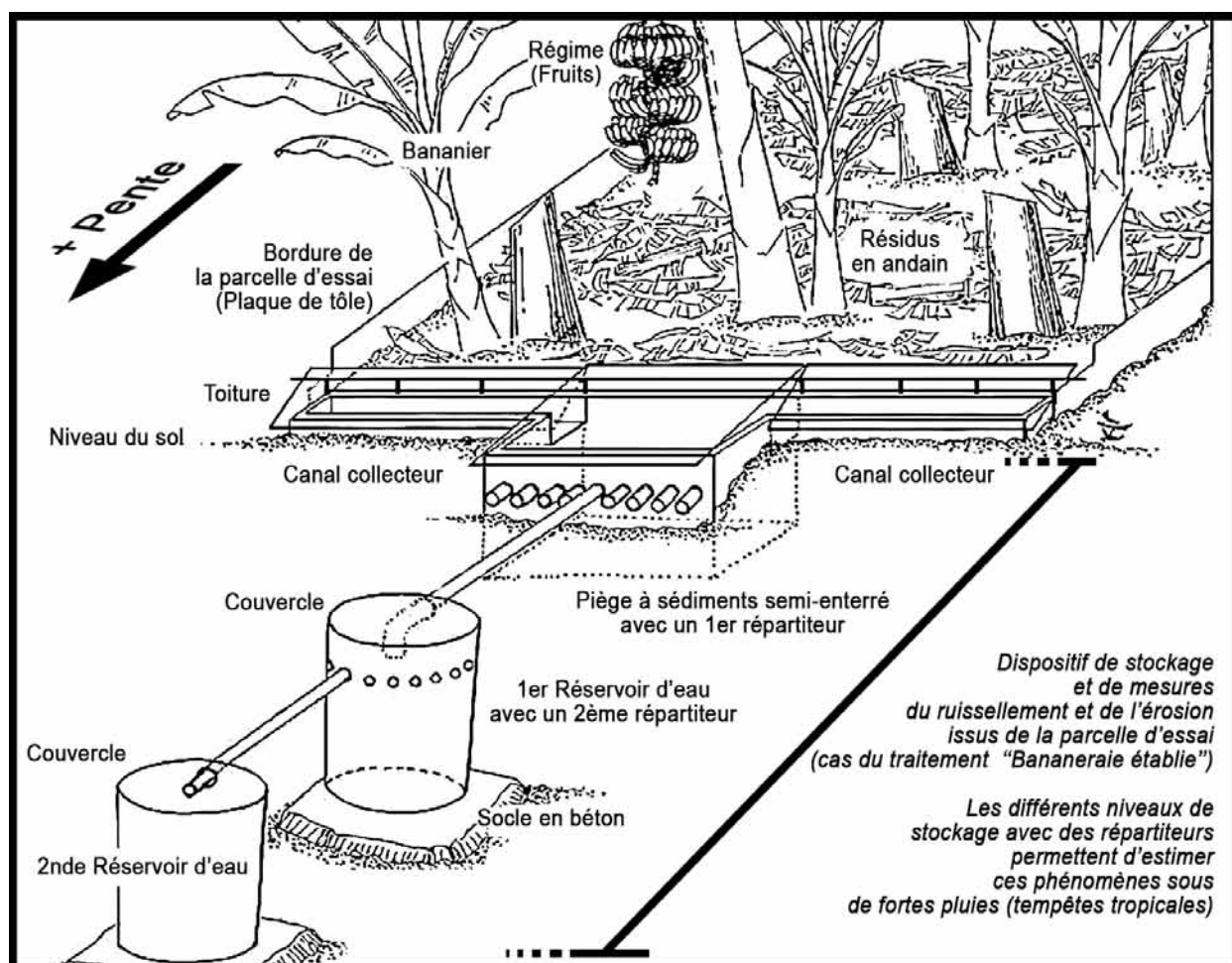


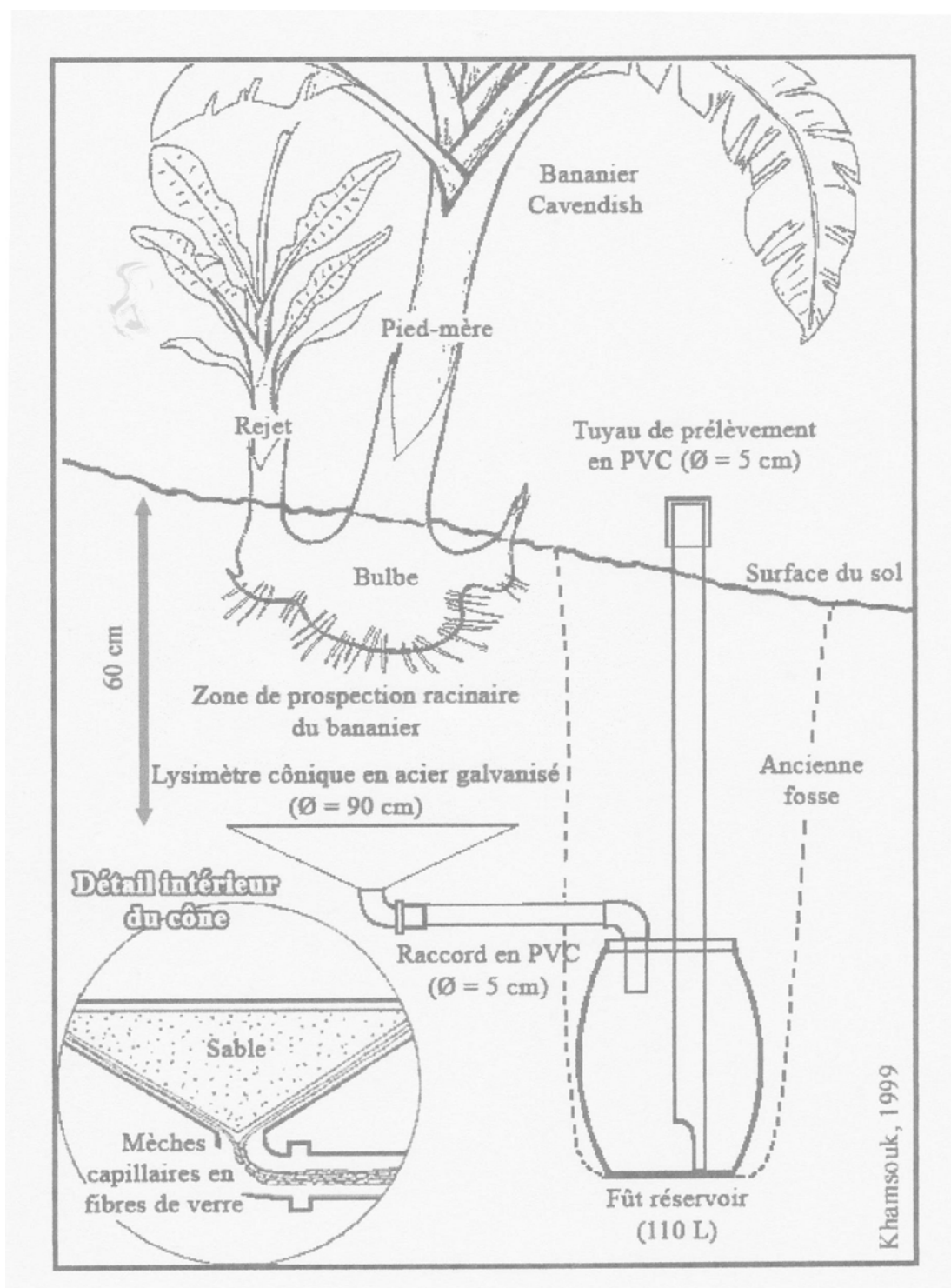
Figure 18.1. Parcelle expérimentale équipée d'un dispositif de stockage et de mesures du ruissellement et de l'érosion et testant le traitement cultivé en « bananeraie établie ».

*La **canne à sucre** avec paillage de résidus de culture est un traitement proposé comme jachère, en alternance à la bananeraie intensive, quand celle-ci, fatiguée par la pression parasitaire (charançon, nématodes, maladie cryptogamique) doit être arrachée parce qu'elle n'est plus aussi productive. Cette alternance avec la culture sucrière est retenue pour plusieurs raisons : elle reflète une rotation de culture pratiquée dans l'île, permettant d'occuper le sol et d'en dégager une production économique, elle assainit le sol de la pression parasitaire et peut protéger le sol d'éventuels risques d'érosion. Trois parcelles de 200 m² de canne à sucre **Ca11**, **Ca25** et **Ca40** sont installées respectivement sur les trois pentes à 11%, 25% et 40%, après arrachage d'anciens pieds de bananiers et un travail réduit du sol : les boutures de cannes sont plantées sur 13 lignes horizontales, équidistantes de 1,5 m, puis, l'espace interligne est paillé avec les résidus organiques de la culture précédente (biomasse aérienne de bananiers).

*La **culture de l'ananas, billonnée** dans le sens de la pente, qui est un système intensif pratiqué chez les planteurs au Nord-Est de l'île et en rotation avec la production bananière, est reproduite dans la parcelle de 200 m² **An7** sur une pente de 7 %. Les précédents bananiers sont arrachés, puis leurs résidus découpés sont enfouis dans le sol moyennant des travaux mécanisés conséquents (broyage, labour avec retournement sur 20 cm et billonnage dans le sens de la pente) avant la plantation de rejets d'ananas sur sept rangs (densité : 42 500 pieds/ha).

*La **culture de l'ananas plantée à plat, avec paillage des inter-rangs**, est un traitement inédit proposé en comparaison avec le système intensif précédent et elle est installée sur la parcelle voisine de 200 m² **An9** située sur une pente de 9%. Une fois les bananiers précédents arrachés et leurs résidus mis de côté, le sol reçoit un travail mécanique réduit sur 20 cm à la rotobêche avant la plantation des rejets d'ananas sur sept rangs dans le sens de la pente (densité comparable : 40 000 pieds/ha) puis le paillage des inter-rangs avec les résidus de la culture précédente.

Figure 18. 2. Lysimètre cône disposé sous le réseau racinaire d'une touffe de bananier (60 cm).



Pour aborder l'évaluation des risques de lixiviation des engrais, on a enterré cinq lysimètres coniques sous cinq pieds de bananiers situés en haut des parcelles d'érosion de bananeraie établie (Ba 11 et Ba 9). A partir d'une fosse temporaire on a installé à 60 cm de profondeur, directement sous la zone racinaire, un cône raccordé à son réservoir (fût de plastique, fermé, de 110 litres) avant de refermer la fosse temporaire (voir figure 2). Une fois par semaine, on pompe l'eau gravitaire accumulée dans le fut de stockage via le tuyau de prélèvement. Bien que ces lysimètres réduisent le volume drainé (pas de succion par la base du profil), ils donnent une bonne idée de la qualité chimique des eaux de drainage. Grâce à des tensiomètres enfoncés vers 30 cm dans le sol, on a estimé l'évolution du stock d'eau du sol entre la saturation ($pF=0$) et la capacité au champ ($pF=3$).

A partir des relevés journaliers ou hebdomadaires, on a mesuré la pluviosité et l'ETP à la station météorologique, tandis que le ruissellement, les variations de stock et l'infiltration gravitaire sont déterminés sur le site expérimental.

Les échantillons d'eau et de sédiments érodés ont été analysés au laboratoire du CIRAD-FLHOR de Martinique (NO_3 , NH_3 , P_2O_5 , K, Ca Mg échangeables). Pour évaluer les risques de pollution des eaux, on a relevé le dépassement des limites de concentration et évalué la part des pertes d'engrais par rapport aux apports.

3. Résultats

La pluviosité et ses caractéristiques

D'après les données météorologiques de 1978 à 2000, la pluviosité du site « Rivière Lézarde » est caractéristique d'un climat tropical humide, avec notamment un cumul annuel de 2420 mm/an et une agressivité moyenne des pluies s'élevant à 915 J/m²/h. Le site est donc bien exposé aux risques naturels, avec des répercussions sur l'environnement. En effet, durant les deux années de mesures, les saisons humides, certes différentes, ont provoqué l'une comme l'autre du ruissellement et de l'érosion.

La saison des pluies en 1999 a été particulièrement active, avec trois tempêtes tropicales de 74 à 190 mm/jour et avec des intensités maximales de pluies de 37 à 76 mm/h en 30 minutes tandis que celle en 2000, épargnée par les passages cycloniques, est traversée plus fréquemment par des averses érosives.

Le ruissellement et l'érosion

Les résultats du ruissellement (Cram = coefficient de ruissellement annuel moyen ; CRmax = coefficient de ruissellement max observé lors des tempêtes) et de l'érosion (E= érosion totale ; Susp = suspensions) sévissant sur les 10 parcelles de traitements sont récapitulés dans le tableau 1.

Parmi les traitements testés, il ressort deux groupes au comportement opposé au niveau du ruissellement et de l'érosion :

*d'une part, les traitements sensibles aux pluies agressives et qui voient leur sol se détériorer et s'éroder : les parcelles témoin de sol nu (Nu11, Nu25 et Nu40) et celle d'ananas billonné (An7) ;

*d'autre part, les traitements résistants aux pluies, voire aux tempêtes tropicales et qui connaissent peu d'érosion du sol : toutes les parcelles paillées y compris celles situées sur de fortes pentes (An9, Ba9, Ba11, Ca11, Ca25 et Ca40).

Tableau 18.1. Résultats synthétiques du ruissellement et de l'érosion mesurés sur les différents traitements testés en 1999 et 2000 sur le sol brun tropical, volcanique en Martinique.

Traitements	Parcelles	Pente	Paramètres du ruissellement		Paramètres de l'érosion		
			Cram (%)	Crmax (%)	E (t/ha/an)	Susp.(%)	MA (%)*
Sol nu	Nu11	11	7,1	45,2	85,8	0,5	84
Sol nu	Nu25	25	5,2	31,7	127,5	0,4	75
Sol nu	Nu40	40	4,3	27,7	147,4	0,3	79
Canne à sucre paillée	Ca11	11	0,5	5,9	0,1	100,0	x
Canne à sucre paillée	Ca25	25	0,6	6,5	0,1	100,0	x
Canne à sucre paillée	Ca40	40	0,7	8,2	0,1	100,0	x
Bananeraie établie	Ba9	9	2,4	23,8	0,5	12,4	x
Bananeraie établie	Ba11	11	2,8	26,7	0,4	17,1	x
Ananas billonné	An7	7	11,4	51,1	17,2	2,4	78
Ananas à plat avec paillage	An9	9	0,6	6,7	0,0	100,0	x

* MA : taux de macro-agrégats érodés (éléments du sol de diamètre >200 µm)

x : non déterminé

En regardant de plus près les traitements sensibles, on constate que les parcelles ruisselant fréquemment durant l'année sont aussi celles qui subissent un écoulement fort sous les pluies violentes (association parallèle des coefficients de ruissellement Cram et Crmax).

Parmi les traitements paillés qui ruissellent peu durant l'année (Cram < 2,8%), on notera qu'en cas de tempêtes tropicales, la bananeraie établie (Ba9 et Ba11) ruisselle beaucoup d'eau sans toutefois entraîner de perte en terre (Crmax de 24 et 27% et E < 0,5 t/ha/an). Ce comportement aux pluies violentes peut s'expliquer d'une part, par l'effet entonnoir de la morphologie du bananier et de ses feuilles qui concentrent l'eau de pluie d'après nos observations au champ durant une averse de 30 mm environ et/ou d'autre part, par le sol plus filtrant pour les traitements paillés de canne à sucre et d'ananas à plat dû à la préparation de la terre lors de leur plantation.

Ces résultats montrent que le paillage est un excellent moyen pour protéger le sol, même sur des pentes de 40% et même en cas de tempêtes cycloniques (P > 190 mm en 24 heures).

L'efficacité du paillage pour protéger le sol de l'érosion

Pour démontrer l'effet de protection du sol par le paillage, nous pouvons nous appuyer sur les états de surface parcellaire mesurés mensuellement via les repères fixes que sont les diagonales des essais. Il y a quatre états évolutifs de surface au sol distincts :

*le sol dénudé sur les parcelles témoins, avec un taux de couverture inférieur à 15% qui est composé de cailloux et de résidus organiques de l'antécédent cultural ;

*les traitements paillés de canne à sucre et d'ananas plantés à plat ont un taux de couverture au sol de 60 à 90 % dû aux résidus organiques et à la croissance végétative des plants d'ananas et des cannes à sucre dont les feuilles tendent à verser ;

*la bananeraie établie est un traitement paillé distinct des autres avec un taux constant de couverture au sol de 50 à 70 %, dû au cycle de production (œilletonnage des rejets sauvages, coupe du

ped du bananier à la récolte du régime et réorganisation des bandes paillées avec les nouveaux résidus de culture) ;

*l'ananas billonné voit son taux de couverture au sol augmenter de 35% à 80% de la parcelle suivant la croissance des plants (feuilles disposées en couronne et recouvrant de plus en plus les billons, mais à quelques cm de la surface du sol).

En comparant ces états de surface avec les résultats de ruissellement et d'érosion, il apparaît clairement que la couverture du sol a un effet protecteur efficace. Les traitements paillés répondent aux pluies érosives en conservant en place le sol même très boueux à l'inverse du sol dénudé, bien marqué par d'importantes pertes en terre. On soulignera que l'ananas billonné qui a certes un bon taux de couverture au sol, reste sensible au ruissellement et à l'érosion due à l'effet de concentration des sillons. Cette pratique agricole dégrade donc le sol comme l'ont déjà démontré par le passé bon nombre d'études similaires sur des systèmes culturaux comparables en Afrique et dans les îles volcaniques d'Hawaii (Winchester et al., 1989).

Le comportement du sol brun à halloysite et les caractéristiques de son érosion hydrique

Avec une saison des pluies actives, traversée par des cyclones, nous voulions caractériser l'érosion hydrique, à travers les trois parcelles témoin du sol dénudé. C'est important car nous nous intéressons aux processus se déroulant au niveau de la parcelle, voire du versant.

Sur les traitements érodés que sont les sols nus et l'ananas billonné, il y a une grande proportion de sédiments grossiers dans la perte totale en terre (taux >75% de macro-agrégats). Nous avons donc à faire à une érosion hydrique qui est non-sélective sur ce sol volcanique à l'exploitation bananière de « Rivière Lézarde ». C'est-à-dire que lors d'une averse agressive avec une intensité pluviale forte, la pluie provoque un ruissellement dit 'hortonien' suffisamment fort pour transporter toute la terre de surface, y compris les agrégats, malgré la forte stabilité des agrégats du sol, sa forte résistance à s'émietter sous l'eau pluviale et la grande capacité du sol à infiltrer l'eau (voir photo 1).



Photo 18. 1. Série de clichés pris sur les phénomènes observés sur les traitements testés. Ruissellement sur le sol nu (Nu11) – Détail des sédiments érodés et piégés dans le canal collecteur et dans la cuve de

stockage – Eau de ruissellement claire issue de la parcelle en canne à sucre paillée (Ca11) après la tempête tropicale Lenny (190 mm/24 h).

L'influence de la pente sur le ruissellement et sur l'érosion

Avec le traitement témoin en sol nu, les résultats du tableau 1 montrent que si l'érosion augmente bien avec l'inclinaison de la pente, conformément au sentiment général, le ruissellement lui diminue ! Un paradoxe quand on parle d'érosion hydrique et où l'on s'attend à une proportion entre le volume d'eau ruisselée et les pertes en terre transportées par l'eau ! Avec l'augmentation de la pente sur ce sol volcanique, l'érosion hydrique en nappe évolue en rigole ($P > 15\%$), puis en une érosion concentrée en coulées boueuses creusant des rigoles (Roose, 1994). Le taux de rigole augmente de 0 à 20 % sur Nu 11 %, à 30 % sur Nu 25 % et 42 % sur Nu 40 %. Plusieurs chercheurs ont expliqué ce mécanisme du ruissellement sur les pentes accidentées, ailleurs dans le monde :

- *Soit par l'existence d'un processus de pente hydraulique lié à la topographie où la baisse du ruissellement serait due à une meilleure infiltration gravitaire d'eau par le sol (Roose, 1994);
- *soit par des fissurations différentielles à la surface du sol dues aux écoulements boueux et entraînant par conséquent une meilleure infiltration du sol.

Nous retiendrons que l'augmentation de la pente induit bien un changement du processus érosif sur le sol en accentuant la perte en terre et en réduisant le ruissellement ; des phénomènes analogues ont été observés sur des sols volcaniques en Equateur (De Noni et al., 1986) et des sols ferrallitiques sableux en Côte d'Ivoire (Roose, 1981). Néanmoins, le paillage reste un excellent moyen pour lutter contre l'érosion et conserver le sol en place malgré des pentes de plus de 40 %.

***La faisabilité de la conservation du sol**

Les systèmes intensifs de cultures bananières génèrent beaucoup de biomasse (127 à 167 t/ha de feuilles et faux troncs) durant leur cycle de production (40 t/ha de fruits).

Or, la manipulation de ces résidus fait déjà partie de l'itinéraire cultural de production bananière. Par exemple, celui-ci requiert la coupe des feuilles et du pseudo-tronc après la récolte du régime et la suppression des rejets sauvages à l'œilletonnage (sélection du prochain pied porteur du futur régime). La culture bananière produit donc d'elle-même le moyen pour lutter contre le ruissellement et l'érosion du sol.

Pour augmenter son efficacité et conserver le sol en place, l'organisation des résidus en bandes paillées perpendiculaires au sens de la pente a montré des résultats probants dans la réduction des risques de dégradation au niveau de la parcelle. Ceci est valable non seulement pour la bananeraie établie mais aussi et surtout au changement de la rotation culturale pour les nouvelles plantations en cannes-à-sucre ou en ananas.

Comme ces résidus organiques mettent plus d'une année à se dégrader au champ, le paillage ou son organisation en bandes ne relève pas d'un surcoût élevé et complémentaire en main d'œuvre. Tout au plus, cette lutte antiérosive représente 25% du temps de travail supplémentaire pour les ouvriers agricoles mobilisés dans la récolte de la bananeraie.

Quant à la faisabilité du paillage organisé à la plantation en canne à sucre ou en ananas, cette opération de lutte antiérosive va certes nécessiter plus d'opérations et générer un surcoût estimé aussi à 25% en plus pour les travaux culturaux, avec notamment des interventions telles que mettre d'abord de côté les résidus organiques avant la préparation du sol pour la plantation, puis redéployer les résidus en bandes pour protéger le sol. Mais, ce surcoût reste acceptable au regard des résultats de la réduction des effets de ces systèmes de production industrielle sur l'environnement (conservation de l'eau et érosion nulle).

Encore un mot sur le paillage à la plantation en canne à sucre ou en ananas : il faut prévoir les travaux de plantation et de rotation culturale à la saison sèche, entre janvier et mai. En effet, l'absence de pluies agressives à cette période est non seulement propice aux travaux culturaux et mécanisés, mais elle assure une sérénité face aux faibles risques de dégradation du sol fraîchement dénudé. Ensuite, quand la saison des pluies arrive, la croissance des plants et leur expansion foliaire contribuent à protéger le sol en plus du paillage organisé.

Le bilan hydrique en culture bananière

Le climat tropical humide à « Rivière Lézarde » convient bien à la culture bananière très gourmande en eau (100 à 150 mm/mois, ce qui représente 62% des pluies annuelles et 94 % des pluies en saison chaude). En saison humide, les averses maintiennent une humidité constante du sol (> 50% dans les 30 cm du sol évalué par les tensiomètres). En saison sèche, l'humidité pondérale peut descendre à 30% : on irrigue alors par aspersion 2 heures tous les trois jours pour que la bananeraie ne souffre pas de stress hydrique. Le bilan hydrique moyen pour 1999 et 2000 se présente ainsi :

Pluies=1888mm (100%), ETR = 1175 mm (62%), Ruissellement = 57 mm (3 %),

Drainage = 617 mm (33%) et variations du stock du sol = 38 mm (2 %).

Il apparait que le drainage est dix fois plus élevé que le ruissellement à cause du paillage et de la stabilité des agrégats de la surface de ce sol argileux. Cette remarquable capacité d'infiltration a été confirmée sous pluies cycloniques simulées (300 mm en 3 heures) : d'où un risque élevé de lixiviation des nutriments solubles et de pollution des nappes.

Qualité des eaux de ruissellement et d'infiltration gravitaire

Comme indicateurs de la pollution des eaux, nous tiendrons compte de la limite officielle de nitrates max de 50 mg/litre et de 2 mg/l pour le phosphore total : au-delà de ces concentrations on risque l'eutrophisation des eaux c.a.d. une prolifération des algues. Il n'y a pas eu de pic de pollution au nitrate dans les eaux de ruissellement durant les deux campagnes. Quant au phosphate assimilable, les teneurs restent proches de 2 mg/l et montent parfois jusqu'à 10 mg/l., preuve d'une pollution évidente. Cependant, grâce au paillage, le ruissellement et l'érosion restent négligeables et donc les dangers de pollution aux phosphates également. Parmi les cations, le potassium est moins bien retenu dans le sol et est plus facilement transporté par le ruissellement que le calcium et le magnésium.

Dans les eaux de drainage gravitaire, les nitrates restent < à 50 mg/l., l'ammoniaque et le phosphate assimilable ont des teneurs faibles (< 5 mg/l). Par contre, les eaux de percolation sont plus riches en calcium (20 à 50 mg/l), et en magnésium (entre 7 et 17 mg/l) qu'en potassium (<10 mg/l).

Tableau 18.3. Teneurs moyennes (en mg/l) des eaux de ruissellement et drainage dans la bananeraie établie.

	NH3	N03	P205	K	Ca	Mg
Ruissellement	0,59	2,17	1,23	14,49	3,67	0,42
Drainage	1,50	18,1	0,42	2,19	35,98	12,12

On peut dire que la qualité des eaux à la sortie de la bananeraie établie reste acceptable grâce au paillage qui réduit beaucoup le ruissellement.

Tableau 18. 4. Estimation des pertes chimiques en surface (ruissellement + érosion) et dans les eaux de drainage en bananeraie établie en kg/ha/an.

	Ntotal	P205 ass	K	Ca	Mg
Erosion 0,45 kg	1,06	0,01	0,75	1,72	0,23
Ruissellement 57,15mm	2,77	0,27	7,03	1,75	0,20
Drainage 616,5 mm	230,86	1,07	12,84	191,38	71,77
=====					
Total des pertes 674 mm	234,7	1,35	20,6	194,8	72,2
% des pertes en profondeur	98%	79	62	98	99%
=====					
Apport d'engrais (kg/ha/an)	511	122	1396	298	192
Total des pertes/apports (%)	46	1	1	65	38
% des pertes/drainage/total	45	1	1	64	37
des apports					
=====					
Exportation par la récolte	118	24	427	14	26
Restitution des résidus au sol	129	19	574	176	45
Immobilisation totale	314	56	1317	280	93

Il ressort du tableau 18.4 que les pertes chimiques par les eaux de drainage sont les plus importantes (de 62 à 99 % des pertes). Presque tout l'azote, le Ca et le Mg sont perdus dans les eaux de drainage. Ces résultats sont conformes avec ceux trouvés en Côte d'Ivoire sur un sol ferrallitique acide désaturé (Godefroy, Muller, Roose, 1970). Les pertes importantes de calcium et magnésium par lixiviation par les eaux de drainage semblent inévitables en raison du faible pouvoir d'adsorption du complexe argilo-humique du sol et des faibles besoins des bananiers en Ca+Mg. Le phosphore assimilable est rapidement piégé par les sesquioxides de fer et d'alumine abondants dans ces sols tropicaux : il faut donc distribuer les phosphates emballés dans les composts, paillis, fumiers et autres MO pour éviter son piégeage par R₂O₃. L'apport des résidus de la culture augmente encore la masse des nutriments disponibles mais leur restitution se fait très progressivement. L'épandage d'amendements basiques doit se faire en saison sèche pour limiter la lixiviation par les eaux de pluie. Quant à l'azote, fertilisant essentiel pour la croissance du bananier, il faut le fractionner pour répondre aux besoins immédiats de la culture. Cependant en Côte d'Ivoire, malgré l'épandage d'urée en dix fractions au pied de chaque plant, plus de 50% sont perdus dans les eaux de drainage (Godefroy et al., 1970). Pour récupérer cet azote fuyant sous le niveau exploité par les racines des bananiers, en absence de chloredecone, on peut associer des cultures intercalaires de légumineuses à enracinement profond comme on en trouve au Rwanda et Burundi (Roose, 1994).

Dans le bilan du tableau 18.4, il faut noter l'apport non négligeable de nutriments et de M.O. suite au défrichement et à la récolte des régimes, mais la minéralisation de cette biomasse prend plus qu'un an. N'oublions pas que ce bilan a été estimé dans le cas d'une bananeraie établie protégée de l'énergie des pluies par un paillage réalisé avec les feuilles et stipes des bananiers : il n'est donc pas étonnant que les pertes par ruissellement soient faibles.

Conclusion

Menée sur une exploitation bananière du CIRAD, cette étude expérimentale a montré qu'en Martinique, une île des Caraïbes balayée par les tempêtes tropicales, le ruissellement, l'érosion et la lixiviation des nutriments peuvent sévir sur les sols volcaniques cultivés. Sous les pluies érosives, le ruissellement creuse des rigoles en surface du sol et peut emporter la terre humifère. Face à ces risques d'érosion et de dégradation de la fertilité, il reste pourtant possible d'exploiter les cultures *intenses*, y compris sur des pentes raides, tout en protégeant les sols volcaniques avec du paillage organisé en bandes perpendiculaires à la pente et réalisé à partir de résidus organiques issus de la biomasse culturale.

La production bananière est gourmande en engrais si on veut obtenir des rendements de 40 à 50 t/ha de fruits. Cette proposition pour une agriculture durable vise donc à limiter les répercussions des systèmes de production industrielle intensive sur l'environnement tout en conservant le sol et sa fertilité au niveau de la parcelle. C'est une démarche écologique essentielle si l'on considère que le sol est une ressource nourricière vitale et fragile, que l'on veut préserver durablement.

Si on dispose les résidus de culture en bandes perpendiculaires à la pente, les pertes d'engrais sont limitées dans les terres érodées, mais importantes dans les eaux de drainage : 64% des apports de

Ca, 45% d'azote, 37% de Mg, mais seulement 1% de phosphore (fixé par les R₂O₃) et du potassium (absorbé par les racines).

Nous n'avons pas relevé de dégradation excessive des eaux durant les deux années d'observation. Ce résultat ne vient pas contredire la crise sanitaire du Chlordécone qui a éclaté dans les années 2000 dans les Antilles, vu la longévité et la stabilité de ce pesticide dans le sol des bananeraies. Depuis 2002, on a trouvé le moyen de piéger les charançons par une hormone, méthode propre inexistante auparavant.

Pour préserver les sols, sans doute faut-il accepter une production « biologique », moins productive, et moins rentable. Il y a un équilibre à trouver entre les deux enjeux économiques et environnementaux que l'agriculture raisonnée cherche à atteindre.

BIBLIOGRAPHIE

Colmet-Daage F, Lagache P, 1965. *Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises, Cahiers Orstom Pédol, vol.3 : 91 - 121.*

De Noni G, Nouvelot JF, Trujillo G, 1986 – *Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study*, in : PUC, SMSS, eds, Sixth international soil classification workshop, Chile and Ecuador part 1, Santiago de Chile : 263 – 274.

Dorel M, Lafforgue A, Bretau P, le Breton M, 1996 – *Etude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. Guadeloupe, Projet CORDET 93 DA14, rapport d'exécution Cirad-Flhor / Orstom, 28 pages.*

Godefroy J., Muller M., Roose E., 1970. Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire. *Fruits, 25, 6 : 403-420.*

Khamsouk B, 2001 – *Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite)*, Montpellier, thèse doctorale ENSA, 231 pages.

Khamsouk B, Roose E, Blanchart E, Dorel M, Rangon L, Louri J, Banidol J., 2006 – *Comportement hydrique d'un nitisol cultivé sous simulation de pluies extrêmes. Cas des systèmes intensifs de production bananière en Martinique*, Marrakech, 14^{ème} congrès ISCO, 5 pages.

Khamsouk B., Roose E., 2017. Effets de la gestion des résidus de cultures sur un sol brun tropical volcanique : tests sur divers systèmes intensifs de cultures d'exportation sous pluies naturelles ou simulées en Martinique. In Roose E., « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ; contribution à l'agroécologie. », IRD Editions, Marseille: 223-234.

Lassoudière A., 2007. Le bananier et sa culture. Edition Quae, coll. Savoir Faire, 385 p.

- Marchal J., Mallesarde R., 1979. Comparaison des immobilisations minérales de 6 cultivars de bananiers. *Fruits* 34, 6 : 373-392.
- Rishirumuhirwa T, 1997 – *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles dans les hauts plateaux de l’Afrique orientale (Application au cas de la région Kimiro-Burundi)*, Lausanne, thèse doctorale n°1636, Ecole Polytechnique fédérale, 320 pages.
- Roose E., Godefroy J., 1977. Pédogenèse actuelle d’un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de Basse Côte d’Ivoire. Huit années d’observations sur l’érosion, le drainage et l’activité des vers de terre à la station IRFA d’Azaguié. Document IRFA-ORSTOM, 116 p.
- Roose E, 1981 – *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux d’Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*, Paris, Coll. Travaux et Documents Orstom, n° 130, 587 p.
- Roose E, 1994 – *Introduction à la gestion conservatoire de l’eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO. N°70*, Rome, 422 pages.
- Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l’agroécologie. Editions IRD, Marseille, 712 p.
- Winchester-Chromec F, El-Swaify SA, Lo AKF, 1989 – *Erosion problems and research in Hawaii*, Topic in *Applied Resource Management*, n°1: 143-74.
- Wischmeier WH, Smith DD, 1978 – *Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning*, Washington, US Department of Agriculture, Agriculture Hand-book, n° 282, 58 p.

Chapitre 19

Conservation de l'eau et aménagement des sols dans les Hautes Terres de Madagascar

P.F. Chabalier, J.L. Rakotomanana, M.A. Razafindrakoto, E. Roose

1. Problématique

C'est à Madagascar que les recherches en parcelles et bassins versants et les réalisations en milieu réel concernant la protection des sols contre l'érosion, la gestion des eaux de surface et la restauration de la fertilité des sols, ont été les plus intenses depuis les années 1950 en milieu tropical montagnard africain (Chabalier, 2006). Une synthèse de la bibliographie a recensé plus de 4200 articles et documents sur la conservation des sols à Madagascar (Raunet, 1994). Dans ce chapitre, nous tenterons de rappeler les tendances actuelles vers une approche qui réponde aux problèmes et aux limites des communautés villageoises.

En effet, les paysans malgaches occupant les Hautes-Terres vivent essentiellement des rizières irriguées dans les fonds de vallées (10 % de la surface) et de l'élevage extensif sur les flancs des collines, les sommets rocaillieux étant couverts jadis de forêts. Avec la récente croissance démographique, le surpâturage des parcours et des forêts, le défrichement des forêts galeries, l'extension des cultures sur les flancs des collines (tanety) entraînent la réduction du couvert végétal, l'augmentation du ruissellement, de l'érosion et de la dégradation de la fertilité des sols. Lors des pluies surabondantes des tempêtes tropicales et des cyclones, le ruissellement dévale les collines, entraînant le décapage des horizons humifères des champs cultivés, le creusement de ravines profondes (lavaka) sur les versants, leur extension en larges cuvettes et l'ensablement des rizières.

Devant la dégradation de leurs ressources en énergie (bois de feu), en eau (ruissellement et inondations) et surtout en aliments, les paysans ont développé des stratégies améliorant la productivité de l'élevage (l'utilisation des adventices et résidus de culture comme fourrage, régénération de l'herbe verte sur les parcours par des feux précoces), la disponibilité en eau pour semer le riz sur des parcelles collectant le ruissellement favorisé par des feux tardifs, la fertilité des sols (concentration du fumier et

des cendres sur les rizières) et l'aménagement des zones marécageuses pour créer des rizières inondables en courbe de niveau (Rakotomanana, 1987). Ils ont protégé les champs sur les tanety par un canal de protection en pente faible (0,3%) évacuant le ruissellement provenant des parcours vers des chemins d'eau (évoluant souvent en ravines). Localement, ils ont créé des billons isohypses plantés de *Pennisetum purpureum* pour ralentir le ruissellement sur les tanety, créer progressivement des talus et orienter les travaux culturels.

Mais malgré ces efforts, la dégradation de la productivité des sols a continué en même temps que l'augmentation de la pression sur les terres cultivables. Les services forestiers ont alors tenté des programmes de Défense et Restauration des Sols (DRS) visant la protection de grands bassins versants (ex. le BV du lac Alaotra) : reforestation des sommets, lutte contre les feux, plantation de lignes d'arbres tous les 50 m dans la zone de parcours, stabilisation des lavakas par des petits barrages, diguettes en terre plantées de graminées sur les tanety, restauration des fossés d'irrigation et de drainage dans les vallées rizicoles. Avec l'indépendance, les financements internationaux ont progressivement tari. L'approche de grands projets mécaniques imposés par l'Etat ont été abandonnés au profit de nombreux petits projets initiés par des villageois et des ONG, orientés vers la protection de l'environnement rural et le développement d'une agriculture familiale durable et plus productive.

Il n'est pas possible dans ce chapitre de faire la synthèse ni l'historique de tous les travaux entrepris : c'est l'objet du projet PCS réalisé en 1996 par une équipe multidisciplinaire de chercheurs du FOFIFA, CIRAD, ONE (501 pages). Mais il eut été dommage de ne pas présenter rapidement les résultats des études et l'évaluation des aménagements réalisés sur les Hautes-Terres de Madagascar par quelques spécialistes ayant vécu longtemps sur place. Nous présenterons enfin quelques propositions peu onéreuses et adaptées aux possibilités des paysans.

2. Le milieu

Les Hauts plateaux malgaches forment une région complexe de formations anciennes éruptives (granites et gabbro peu altérables qui affleurent sur les versants) et métamorphiques (gneiss, migmatites, schistes qui disparaissent sous plus de 20 mètres d'altérites). On distingue des restes *d'aplanissements anciens* avec de larges interfluviaux portant des sols organiques, des niveaux de *croupes (tanety)* avec des pentes fortes et des bas-fonds à sols hydromorphes minéraux et des *reliefs résiduels*

formés de crêtes et de pentes raides encadrant des rivières temporaires recreusant sans cesse leur lit.

Le climat est de type tropical d'altitude (alt.= 900 à 1700 m). La pluviosité varie autour de 1500 mm au Nord, 1200 mm au Sud, 1950 mm à l'Ouest. On distingue deux saisons : une saison chaude ($T_m = 20^\circ\text{C}$) et pluvieuse (1320mm) de novembre à avril, une saison froide de mai à octobre ($T_m = 15,3^\circ\text{C}$ et $P_m = 220$ mm). Les basses températures de la saison froide ($T_{\text{mini}} = -0,3$ à $+2,9^\circ\text{C}$) limitent le développement de la végétation. Les études en parcelles d'érosion ont montré que chaque année sept tempêtes ou cyclones provoquent 85 % des pertes en terre : d'où l'importance de couvrir le sol pour augmenter l'infiltration au champ. L'indice d'agressivité des pluies (USLE de Wischmeier) R varie de 359 à 508. Les sols ferrallitiques acides des versants sont très résistants à l'érosion en nappe : K varie de 0,05 à 0,20 en fonction de l'humus et du taux de limon et de sable fin. Par contre, lorsque le ruissellement se concentre en rigoles qui pénètrent sous l'horizon B dans les altérites tendres, il creuse des ravins profonds appelés « lavakas » qui drainent la nappe phréatique et répandent dans les rizières des masses impressionnantes de sables stériles qui dégradent leur productivité (Bailly et al., 1976).

L'agriculture est axée sur la riziculture irriguée de bas fonds, et secondairement sur l'élevage et les cultures sèches sur les versants. Là où c'est possible on trouve du maraîchage, de l'arboriculture et même de l'agroforesterie. Chaque exploitation familiale comporte en moyenne un hectare dont 60 % de rizières inondables qui rapportent plus de 80 % des revenus. En fin de saison sèche, les petits ruisseaux sont taris et il faut attendre le mois de décembre pour cumuler les 200 mm de pluie indispensables pour la mise en boue des rizières. La période de janvier à avril est insuffisante pour les variétés de riz à cycle long qui sont utilisées. D'où le semis du riz en pépinière dès les premiers orages d'octobre produisant suffisamment de ruissellement sur les collines. La tradition veut qu'on mette le feu sur les parcours pour régénérer les vieilles touffes d'herbes et pour provoquer une augmentation du ruissellement lequel est valorisé par la riziculture (Rakotomanana, 1987).

3. L'influence des techniques culturales

Des études en parcelles d'érosion et en bassins versants expérimentaux ont été menées pour cerner le comportement du sol en fonction de la gestion du couvert végétal

sur les parcours (brûlis, mise en défens, fauchage, prairie artificielle) et la mise en culture des sols (Rakotomanana, 1984).

A Befandriana, Vergnette et al., (1971) ont comparé pendant deux campagnes sur six parcelles d'érosion de 200 m², l'influence de divers couverts végétaux sur des pentes de 9 à 14 %. Les pluies, très agressives, dépassent 2000 mm. Le ruissellement annuel atteint 50 % sur parcours et même 60 % en cas de feu annuel ; le labour réduit le ruissellement à 30 %. Le labour en courbes de niveau réduit les pointes de ruissellement, mais son action sur l'infiltration diminue avec les pluies lorsque le sol est nu. Les pertes en terre s'élèvent à 582 t/ha/2ans sur la parcelle nue, 166 t/ha/2ans sous semis de *Stylosanthes* (développement lent la première année), 46 t/ha/2ans sous prairie brûlée et 4 à 8 t/ha/2ans sur les parcelles labourées en fonction du couvert végétal introduit. La deuxième année, à mesure du développement du couvert végétal, les pertes en eau et terre diminuent nettement. La culture en bandes étroites semble une option intéressante en particulier pour introduire des légumineuses sur ces sols ferrallitiques moyennement résistants (K USLE = 0,18) sous graminées surpâturées.

Sur les parcelles d'Ambatomainty et Manankazo, il a fallu une réduction radicale du couvert végétal pour observer un changement significatif du ruissellement : seule la mise à feu a entraîné un peu plus de ruissellement (+2%) et d'érosion (2 t/ha/an). A Ampangabe, on a étudié l'influence des dates de labour et la gestion des résidus de récolte (pailles exportées, brûlées, enfouies, mulchées). Le traitement le plus érosif est le labour en juin avec pailles exportées. C'est le non labour avec pailles mulchées qui protège le mieux les parcelles cultivées (Rakotomanana, 1984).

Sur les bassins de Manankazo (de 1962 à 1977, pluie moyenne de 1800 mm), on a confirmé que les feux sous forêts augmentent le ruissellement et l'érosion, tandis que le reboisement en *Pinus patula* et la mise en culture avec aménagement rationnel (rotations, 4 années de cultures suivies de 3 années de jachère, labour en courbes de niveau aboutissant à des terrasses progressives) valorise le mieux les pluies au champ (Rakotomanana, 1984).

En station de recherche, la mise en défens a mal fonctionné, car elle aboutit à une perte de fourrages sans que l'embroussaillage ne réussisse par manque d'arbres semenciers. Le reboisement en *Pinus patula* sur terrain sous-solé puis billonné a réussi à limiter l'érosion malgré un feu courant en 1978. Sous culture, les ados fixés par *Pennisetum* et les labours versant en aval ont abouti à la formation de terrasses

progressives en 4 ans. Les cultures ont été engraisées copieusement par une fumure de fond (30t de fumier + 2 t de dolomie + 300 kg de P205 et 300 kg de K20) ainsi qu'une fumure d'entretien (5 t/ha de fumier + NPK).

Mais chez les paysans, la situation est bien différente. Le souci majeur est l'inondation précoce des rizières permettant le repiquage des semis. Un labour de défrichement sur les tanety est entrepris en février dès la fin des travaux des rizières et une reprise en octobre avant l'inondation des rizières. La fertilisation est quasi inexistante (à part un peu de fumier posé dans les trous de plantation). Un terrain brûlé fournit des cendres et 26,3 mm. de ruissellement : il faudrait donc dix ha de terrain brûlé pour inonder correctement un ha de rizière. C'est le rapport tanety / rizière qu'on observe en moyenne sur les Hauts Plateaux.

Beaucoup de paysans élèvent du bétail pour produire du lait et du fumier, tirer la charrue et constituer une épargne. Les bœufs se nourrissent sur les parcours communs, les jachères et les rizières après la récolte : il n'y a quasiment pas de culture fourragère. Mais cette alimentation est pauvre en protéines et minéraux : les bœufs maigrissent en fin de saison sèche, au moment des lourds travaux. La régénération des parcours par le feu sert à activer la repousse pour nourrir les bœufs au moment des grands efforts (labour et hersage de la rizière). L'abondance de verdure en saison des pluies retape rapidement les bœufs (Rakotomanana, 1987).

Sur les ferralsols désaturés, les pluies cycloniques abondantes, le labour conventionnel et les sarclages répétés sur des pentes fortes et la faible utilisation d'intrants favorisent l'érosion hydrique. Pour protéger les sols, des dispositifs mécaniques et biologiques variés ont été proposés qui ont réduit l'érosion mais pas supprimé la dégradation de la productivité. Pour tester l'effet des systèmes de semis direct sous couverture végétale sur l'érosion, la disponibilité en eau et la production de trois cultures (maïs, riz et haricots), le FOFIFA et le CIRAD ont mis en place près de Antsirabé 15 parcelles d'érosion (21 m²) dans 20 parcelles de 48 m², de 10 à 13 % de pente. Le labour a été effectué sur 30 cm à l'angady (bêche locale) et l'ensemble des parcelles a reçu la même dose d'engrais (5 t/ha/an de fumier, 0,5 t de dolomie, 0,1 t d'urée et 0,3 t de N11, P22 et K16). La rotation biennale maïs+haricots, puis riz pluvial en culture pure, s'est inspirée de celle des paysans. Les parcelles SCV ont reçu un paillage avec les résidus de la culture de l'année précédente ou une couverture vivante de *Brachiaria ruziziensis* (Norsoa, 2017). Le ruissellement sur labour ou sol nu est 8 à

14 fois plus élevé que sous semis direct sous litière. L'érosion annuelle diminue de 22 t/ha/an sur parcelle nue, à 7,6 t/ha sur parcelles labourées à 0,13 t/ha/an sous SCV. Le rendement en haricot est meilleur sur semi direct, mais diminue avec le temps. Les rendements en riz sont plus élevés sur sol labouré tandis qu'on n'a pas relevé de différence pour le maïs. La couverture vivante de *Bracharia ruziziensis* a plus concurrencé les haricots que le SCV recouvert des pailles de la culture précédente. Comme en d'autres lieux, le SCV a réduit significativement le ruissellement et l'érosion (Razafindramanana, 2017). Par contre l'effet sur le rendement en grains dépend du type de plante cultivée, de la plante de couverture et du développement des adventices : le système en semis direct entraîne l'usage d'herbicides, actuellement très critiqués, et la maîtrise des feux et de l'élevage en liberté durant la saison sèche (Roose, 2017).

4. La gestion de la fertilité des sols cultivés.

Traditionnellement, l'entretien de la fertilité des sols est assuré par une jachère à *Aristida* et *Cynodon* plus ou moins longue. En milieu paysan, l'usage du fumier est réservé à la rizière. En culture sèche sur les collines, rares sont les apports d'engrais organiques ou minéraux : après quatre années de culture, la terre épuisée est abandonnée à la jachère naturelle le plus souvent soumise au parcours du bétail. Avant sa remise en culture, la jachère est surpâturée et /ou brûlée si bien que la restitution de MO aux horizons de surface est fort restreinte.

Le rôle principal de l'élevage c'est de constituer une caisse d'épargne pour faire face aux événements exceptionnels de la famille (mariages, maladies et enterrement) et surtout de produire assez de fumier pour assurer la production de riz, base de la nourriture. Pendant la journée, le bétail parcourt la jachère, les résidus de cultures, les bords des chemins et les terres communales. Le soir, le bétail rentre à l'étable près de l'habitat, (parfois au fond d'un trou pour éviter les vols) où il reçoit un complément de nourriture (céréales ou adventices extirpées des champs) en période de gros travaux. Les sols étant acides et très pauvres en phosphore assimilable et en nutriments, la végétation ainsi que les fumiers sont peu abondants et pauvres en minéraux. Des compléments de sels sont parfois apportés sous forme de pierre à lécher. S'il y a du compost, il est déposé dans les trous de plantation des cultures maraîchères.

A Manankazo, station du FOFIFA, le sol sous la jachère brûlée dégradée n'accumule sur 30 cm que 27 à 49 t/ha de carbone, alors que la forêt en stocke 128 t/ha. Après l'enfouissement de 7 années de jachère de *Tephrosia vogelii*, on a stocké 119 t/ha

de carbone, après 10 années de jachère à *Calliandra calothyrsus*, le stock atteint 109 t/ha, et après 5 ans de *Flemingia congesta* 97 t/ha de carbone (Razafindrakoto, 2005). Parallèlement, les jachères de légumineuses de 5 à 10 ans, enfouies à 15 cm de profondeur ont augmenté les taux de MO du sol (de 4,2 % pour la prairie dégradée, à 8,6 % sous *Tephrosia* de 7 ans, et à 13,5 % pour la forêt), le taux d'azote (de 0,1 à 0,35 %), la conductivité hydraulique (de 25 à 512 et 719mm/h), la porosité de 68 à 78%, la pédofaune totale (de 160 /m² à 2082/m² sous culture, à 2351/m² sous forêt) . En 5 à 10 ans ces trois légumineuses enfouies ont réduit le ruissellement et l'érosion et augmenté considérablement le rendement en haricot (de 0,6 à 5 t/ha) bien que les haricots aient été affectés par diverses maladies. Pour d'autres auteurs, il serait préférable de couper la jachère et de semer directement sous la litière, avec ou sans travail du sol. Cette technique pourrait apporter une solution efficace pour réduire le ruissellement et l'érosion, restaurer la fertilité du sol, augmenter la production, réduire le temps de travail et la pauvreté des paysans (Razafindrakoto, 2017).

Sur le bassin de Maniandro, à 25 km au NO de Tananarivo, une équipe de géographes et d'agronomes ont mis en place, une étude pour comprendre la dégradation des terres acides des collines (tanety) et les techniques de restauration de leur productivité à portée des paysans pauvres. Trois parcelles d'érosion (10 x 10 m) ont montré aux paysans qu'il était possible de réduire l'érosion de 26,8 t/ha sous manioc non protégé, à 10 t/ha sous manioc protégé par une couverture vivante de *Stylosanthes gracilis* et 7 t/ha sous manioc protégé par un léger paillis. Un test agronomique d'apport d'engrais organiques et minéraux sur haricots a montré que sur un sol ferrallitique acide le rendement est passé de 0,1 t/ha sur le témoin à 0,9 t/ha grâce à un apport de dolomie (1,5 t/ha) et de 15 t de fumier. Sur ce champ bien pourvu en potasse, l'apport de potasse a eu peu d'effet, par contre la dolomie (Ca + Mg) a relevé le pH et supprimé la toxicité aluminique. Le guano et les troncs de bananiers hachés n'ont pas modifié le rendement sur ces essais. Tous ces fertilisants sont disponibles localement, mais les paysans pauvres n'ont pas les moyens d'acheter des engrais chimiques, ni de produire assez de fumier soit qu'ils n'ont pas de vache, soit pas assez de fourrage pour les nourrir donc de produire du fumier. On sait par ailleurs qu'un ménage ne peut produire plus de 5 m³ de compost à partir des déchets ménagers et des résidus de culture. Seule la *couverture* végétale du sol par des légumineuses ou par un paillage léger peut donc réduire les pertes de nutriments par érosion : par contre, l'apport de fumier ou d'engrais complet permet d'augmenter la productivité. Il est donc nécessaire que l'Etat intervienne par des

subsidés pour réduire le coût des engrais et assurer l'instruction des paysans pour restaurer la productivité du sol avec l'aide des ONG (Ratsivalaka et al., 2007).

5. Propositions de gestion durable de la biomasse, de l'eau et des sols

(GCES). La couleur rouge de certaines rivières, les ravines béantes dans les collines, la divagation des fleuves, l'ensablement des rizières et le décapage des horizons humifères des sols cultivés dénoncent l'agressivité des processus d'érosion à Madagascar. Parallèlement, on observe la dégradation du couvert végétal et de la productivité des sols cultivés. Or la population double tous les 20 ans et les terres cultivables sont déjà rares. Les grands aménagements mécaniques des bassins versants (ex. Lac Alaotra) réalisés par l'Administration centrale sans la coopération des paysans, se sont avérés coûteux, peu efficaces et peu durables. Depuis les années 1970/80, suite aux recherches multidisciplinaires, se sont développés des dizaines de petits projets de gestion de l'eau, de restauration des sols, d'agroforesterie, d'irrigation, etc. Nous avons retenu les aménagements suivant qui devront être discutés par les techniciens et paysans et adaptés aux conditions climatiques et socio-économiques des populations.

***Sur les sommets des collines,** les zones rocheuses, les berges des rivières, les sols trop minces, et les pentes trop raides (>60%), planter des arbres multi-usages adaptés au climat, soit après sous-solage, soit dans des cuvettes (Zai) sarclées pour favoriser le démarrage du couvert et la protection contre la divagation du bétail. Prévoir la couverture du sol par des légumineuses (*Stylosanthes gracilis* ou *S. hamata*, *Desmodium intortum*, *Macroptilum atropurpureus*, *Cassia rotundus* ou autres) pendant les 4 premières années, ces légumineuses pourront être fauchées comme réserve fourragère pour la saison sèche. Pour éliminer les herbacées qui favorisent les feux de brousse et concurrencent les arbres (eau et nutriments), on peut aussi pratiquer le système « taungya » qui associe entre les lignes d'arbres des cultures peu exigeantes (manioc, arachide, haricots ou légumineuses fourragères) qui maintiendront le sol propre. Eviter de planter des pins, des conifères et autres espèces très sensibles aux feux. Préférer les eucalyptus en mélange avec des acacias et des essences locales ou exotiques bien adaptées (Peltier et al., 2017), en particulier *Polyscias fulva*, *Maesopsis eminii*, *Grevillea robusta*, *Cedrella serrata* ou *odorata*, *Calliandra calothyrsus*, *Leucaena leucocephala* ou *diversifolia*, *Cassia siamea* (König, 2017; Razafy Fara, 2005). Les collines sont les châteaux d'eau des bassins versants : il faut donc préserver leur couverture végétale permanente, la rugosité de la surface du sol et l'infiltration. La litière déposée par les grands arbres est un moyen naturel très efficace pour protéger la

surface du sol de l'agressivité des pluies et entretenir la diversité de la faune. Le pâturage et le fauchage sont deux techniques intéressantes pour réduire l'importance des feux : les feux très précoces sont moins nocifs que les feux tardifs (Chabalié, 2005). On pourrait s'inspirer des méthodes de gestion des boisements des propriétaires forestiers mise au point dans les Hautes terres de Haute-Matsiatra. Ils préfèrent une sylviculture de taillis sous futaie jardinée qui permet au propriétaire de prélever régulièrement du bois énergie, des perches, du bois de sciage ou de sculpture et divers autres produits pharmaceutiques. Les vieilles plantations sont constituées d'un mélange d'*Eucalyptus robusta*, de nombreuses espèces locales fruitières (manguiers, goyaviers) ou autres (*Melia azedarach*, *Acacia* sp.). *Pinus patula* est traité en futaies. Les trouées peuvent être remises en culture, puis replantées. La sylviculture semble dynamique, ne laissant pas trop de vieux bois mais assez de biomasse. Ce type de sylviculture est résiliente tant écologiquement que économiquement (Peltier, 2021).

* **Sur les flancs des collines, les zones communales de parcours** représentent 55 % de la surface de l'île. On propose d'alterner des haies vives d'arbustes légumineuses fourragères (*Calliandra calothyrsus*, *Leucaena leucocephala* ou *diversifolia*) (2 - 3 lignes en quinconce tous les 25 cm) et des bandes herbacées enrichies progressivement en légumineuses fourragères (*Stylosanthes*, etc) larges de 10 à 25 m selon l'inclinaison de la pente. Il s'agit d'augmenter la production de fourrage de qualité (et donc de fumier). En cas d'extension des zones de culture, il sera facile de pâturer intensément ou de faucher une bande fourragère et d'effectuer un semis sous litière ou de labourer la prairie avant de planter la nouvelle culture. Le labour poussant la terre vers l'aval, il se formera en quelques années des talus (<1,5 m) et des terrasses progressives sur pentes réduites.

* **Sur les flancs cultivés des collines**, faire évoluer des banquettes avec ados imperméables (dangers de débordement et ravinement sans augmentation des rendements) vers de simples micro-barrages perméables (cordons de pierres, haies d'herbes et surtout d'arbustes légumineuses) ou des bandes en cannes à sucre, en bananiers ou en ananas (Roose, 1994) ou plus récemment vers des systèmes de travail réduit du sol sous litières ou sous couverture permanente de légumineuses. Ces techniques contribuent à orienter les techniques culturales le long de haies vives isohypses.

Pour favoriser le démarrage des nouvelles plantations, sur ces sols acides épuisés, un apport de fumier, de dolomie et de phosphates calciques est souhaitable : certaines

roches /altérites broyées noyées dans un compost peuvent aussi améliorer la fertilité du sol, la vitesse de croissance des plantes et la couverture du sol.

***Les rigoles, ravines et lavaka sont des indicateurs** d'un excès de ruissellement. Il faut donc commencer par améliorer l'infiltration dans les zones de parcours et de cultures. Mais une fois que les ravines sont actives dans le paysage, il faut réduire leurs nuisances et les inclure dans la gestion durable de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) du paysage. Une abondante documentation explique l'origine de ces ravines développées quelquefois depuis des siècles, en relation avec le défrichement des sommets, la circulation du bétail, le ruissellement le long des habitations et des pistes ou avec divers maladroites de gestion de la couverture végétale et des feux de brousse répétés. Il est cependant connu que certains paysans en ont récemment tiré un avantage en profitant de cette zone protégée des vents, alimentée par la nappe phréatique et libérée de la masse des altérites des vieux sols ferrallitiques (trop acides et lessivés) pour aménager le site : enrochement et plantations spéciales en tête de ravine (pour absorber l'énergie de chute du ruissellement), éboulements des falaises latérales et aménagement en pente douce stabilisée par des arbustes et légumineuses diverses, création d'une mare stabilisant le flux d'eau pouvant servir de réserve d'irrigation pour les jardins et pépinières en aval, stabilisation du fond de ravine par des micro-barrages (hauteur < 1m) de mottes d'herbes, de macro-boutures, de pierres sèches ou de gabions créant en amont des petits espaces horizontaux pouvant servir de pépinières pour le riz ou de jardins maraîchers, création de vergers ou de systèmes agroforestiers sur les alluvions limoneuses (baiboho) du cône de déjection (plus ou moins stabilisé par des diguettes en terre) en aval des lavakas.

* **Les rizières** sont organisées en casiers horizontaux, irrigués à partir de sources aménagées ou de chemins d'eau collectant le ruissellement en aval de la zone de parcours et/ou des cultures. Pour réduire les apports de sédiments sableux par les lavakas lors des pluies cycloniques, il faut veiller à couvrir en permanence la surface des zones cultivées et des parcours. On peut aussi entourer la rizière de haies arbustives fourragères filtrantes enrichies en légumineuses rampantes, en cailloux et déchets de labour. Choisir les espèces en fonction des besoins des usagers : du sisal là où on fabrique des sacs en fibres végétales, en *Ziziphus mauritiana* en zone sèche et quelques fruitiers tous les 10 m (manguiers, agrumes, néfliers, grenadiers, etc) . Pour lutter contre les conséquences du changement climatique, on peut choisir des variétés de riz à cycle plus court, le semis direct dans la rizière et une meilleure gestion du ruissellement lors

des pluies cycloniques surabondantes (barrages collinaires ou semis direct sous une couverture permanente). L'enfouissement lors du labour des pailles de riz ne suffit pas pour entretenir sa productivité : il est indispensable d'y apporter du fumier et des compléments minéraux en fonction des rendements croissants attendus.

6. Discussion et conclusions

L'érosion et le ruissellement représentent évidemment un frein au développement d'une agriculture intensive et durable indispensable pour la population malgache en pleine expansion. Mais les solutions diffèrent d'une zone agro-écologique à une autre, mais aussi d'une tradition culturelle à une autre : il n'existe pas de recette universelle.

La lutte antiérosive a beaucoup évolué en 70 ans, depuis les grands projets de DRS définis par le pouvoir central et imposés à des paysans peu au courant des causes profondes, avec des financements internationaux pour « conserver les sols ainsi que la diversité de la nature »(origine des grands parcs nationaux), jusqu'à une multitude de petits projets proposés par des ONG et des associations paysannes pour restaurer à l'échelle locale la terre ancestrale nourricière. La recherche a eu un rôle majeur pour faire évoluer les techniques antiérosives à mesure que la compréhension des processus et facteurs physiques et humains en cause s'est améliorée. Il reste à mieux exploiter la diversité de la microflore et de la faune des sols.

On ne conçoit pas d'aménagement antiérosif sans l'intensification de la production agricole et l'utilisation raisonnée d'une fertilisation organique et minérale adaptée (Chabalier, 2005 ; Roose, 1994). Les écologistes préconisent de remplacer les engrais « chimiques » qui « dégradent les sols » par des engrais organiques. C'est ce que les agronomes ont tenté lorsque les prix des engrais chimiques ont flambé sous la pression des économistes de la Banque mondiale et du prix du pétrole. En réalité, on s'est rapidement rendu compte que les parcelles cultivées ne produisent pas assez de biomasse pour entretenir la fertilité des champs cultivés intensivement (à peine 30 % d'après Guérin et Roose, 2017) : pour maintenir la fertilité des sols cultivés « en bio », il faut faire appel à des chaulages et/ou des phosphates de chaux (chimiques) et transférer de la biomasse (fumier et paillage), donc des nutriments, depuis des zones extérieures aux champs. Par ailleurs, Liebig a démontré il y a plus d'un siècle que les végétaux ne peuvent se nourrir de matières organiques qu'après minéralisation par les microbes du sol : *d'où le succès des engrais chimiques concentrés et plus faciles à distribuer (Roose, 1994 et 2017). En réalité c'est le mauvais usage des engrais chimiques sans*

compensation par des apports de matières organiques, qui entraîne l'acidification et l'épuisement des sols. En conséquence, il faut développer la fumure organique (pour entretenir la vie microbienne du sol) et la compléter par des apports minéraux raisonnés pour valoriser au mieux la productivité des sols tropicaux.

Pour augmenter l'intérêt des paysans pour la lutte contre l'érosion (gaspillage d'eau, de nutriments et de sol), il faut non seulement leur proposer des systèmes qui améliorent rapidement leur situation financière, la rentabilité du sol et de leur travail, mais aussi améliorer l'environnement économique, la sécurité foncière, le prix payé aux producteurs et le désenclavement du milieu rural (routes vers les marchés). D'où la nécessité de passer de la « lutte contre le ruissellement et l'érosion » à la gestion durable du patrimoine foncier et humain local (Roose, 1994).

Bibliographie

Andriambelomanga E., Ratsivalaka S., Andriamampianina N., Randriaboavonjy J.C., Andriamihamina M., 2012. Amélioration de la gestion paysanne de la fertilité des sols des versants cultivés des collines du BV Maniandro (Madagascar). In « LAE, Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. » E. Roose, H. Duchaufour, G. De Noni, IRD Editions, Marseille : pp.79-90.

Bailly C., Malvos C., Sarrailh J.M., Rakotomanana J.L., Rampanana L., Ramanahadray F., 1976. Etude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion en petites parcelles. *Bois et Forêts des Tropiques N° 169*

Blanc-Pamard C., Rakoto Ramiarantsoa H., 2006. Pratiques paysannes et gestion de l'érosion, exemples malgaches : une ingénierie écologique indigène. : p. 168-178. In « Erosion et GCES. » Les Actes des Journées scientifiques Régionales du Réseau Erosion et GCES de l'AUF. Antananarivo, 190 p.

Chabalier P.F., 2006. Evaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols-avant 1996- à Madagascar. In « Erosion et GCES » Actes des Journées Scientifiques régionales du réseau Erosion et GCES de l'AUF. Antananarivo, 190 p. : 10 à 15.

Guérin H., Roose E., 2017. Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique occidentale. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Eds. E. Roose , IRD Editions, Marseille : 161-178, 711 p.

König D., 2017. Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. pp.613-624. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. » Eds. E. Roose, IRD Editions, Marseille, 711 p.

PCS, 1997. Projet de conservation des sols. Bilan et évaluation des travaux et réalisations en matière de conservation des sols à Madagascar, 501 p.

Peltier R., Bisiaux F., Dubiez E., Marien J.N., Freycon V., 2017. Agriculture sur brûlis de jachère à Accacia. Est-ce durable sur les sables du Plateau Batéké, en République Démocratique du Congo ? p.127-140. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens; contribution à l'agro-écologie. » E. Roose eds., IRD Editions, Marseille , 711 p.

Rakotomanana J.L., 1987. Climat, érosion et techniques culturales sur les Hauts-Plateaux de Madagascar. Min. Recherche Scientifique et Technologique pour le Développement. Dépt. des Recherches Forestières et Piscicoles : 17 p.

Rakotomanana J.L., 1996. Lutte contre l'érosion éolienne et hydrique. : p. 195-237. In « Projet PCS « Bilan des travaux en matière de conservation des sols à Madagascar, avant 1996. » 501 p.

Rakotomanana J.L., 1996. Pratiques agroforestières. Pp. 263-289. In « Projet PCS. Bilan des travaux en matière de conservation des sols à Madagascar, avant 1996. »

Rakotoarisoa J., Arrivets J., Michellon R., 1996. Pratiques conservatoires du sol à la parcelle et systèmes de cultures. In « projet PCS. Bilan des travaux en matière de conservation des sols à Madagascar » : p 290-440.

Ratsivalaka S., Serpantié G., De Noni G., Roose E., 2006. Erosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. Actes des Journées scientifiques régionales du Réseau Erosion et GCES de l'AUF » AUF, Paris : 190 p.

Ratsivalaka S., Andriamampianina N., Mietton M., Puech C., Andriamihamina M., Randriamboavonjy J.C., 2007. Gestion et restauration de la fertilité des sols acides des Hautes - Terres Centrales de Madagascar. Rapport scientifique final du Réseau de recherche sur la GCES de l'AUF, 41 p.

Raunet M., 1994. Inventaire historique et spatial des études, recherches et travaux réalisés à Madagascar depuis 1950 en matière de conservation des sols. Document préparatoire. CIRAD-CA, Montpellier, 131 p.

Razafy Fara L., 2005. La régénération de la fertilité des sols : cas d'un bassin versant à Mirinarivo, Hautes Terres de Madagascar. pp 131-138. In « Erosion et GCES » Actes des Journées Scientifiques régionales du Réseau GCES de l'AUF. Eds ; Ratsivalaka S., Serpantié G , De Noni G et Roose E., AUF, 191 p.

Razafindrakoto M.A., Randriamboavonjy J.Ch., Randrianarimanana H., Andriamampianina N., 2006. Effets des pratiques de jachères légumineuses arbustives sur la séquestration du carbone et l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion. In Erosion et GCES des sols. Actes des Journées scientifiques régionales du réseau Erosion et GCES de l'AUF, Antananarivo. Ratsivalaka S., Serpantié G., De Noni G., Roose E. Eds .:p 119 à 122.

Razafindrakoto M.A., 2017. Influence de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar). In « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie » E.Roose eds, IRD Editions, Marseille, pp 93-101.

Razafindramanana Ch., Douzet J.M. Barthès B., Rabeharisoa L., Albrecht A., 2012. Evaluation des effets de systèmes de semis direct à couverture végétale pérenne (SCV) sur l'érosion et la production agricole sur les Hautes-Terres à Antsirabe (Madagascar). In « LAE, Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles » E.Roose, H.Duchafour, G.De Noni Eds, IRD Editions, Marseille : pp .42-52.

Razafindramanana Norosoa, Douzet J.M., Barthès B., Rabeharisoa L., Albrecht A. 2017. Influence de diverses techniques culturales (SVC-labour) sur l'érosion et le rendement en maïs, riz, haricots sur ferralsols des Hautes-Terres malgaches. In «Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ». E. Roose Eds., Editions IRD, Marseille: pp.377-386.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES, nouvelle stratégie de la lutte antiérosive. Bull. Pédologique N° 70, Rome FAO, 420 p.

Roose E., 1995. La GCES : proposition d'une nouvelle approche de la lutte antiérosive à Madagascar. In « Environnement humain de l'érosion ». De Noni G., Roose E., Nouvelot JF., Veyret Y., *Bull. Réseau Erosion* n° 15 : 189-203.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie. IRD Editions, Marseille, 711 p.

Vergnette B, Bailly C., de Coignac B., Malvos C., 1971. Erosion, ruissellement et bilan hydrique à BEFANDRIANA Nord, Madagascar : résultats après deux campagnes. Rapport CTFT Madagascar, 58 p.

Chapitre 20

Des nouvelles de la lutte antiérosive en Ethiopie

Hans Hurni et Eric Roose

1. Problématique

L'Ethiopie a développé une agriculture depuis des milliers d'années : aussi la dégradation des sols est très avancée, étendue et toujours en progression actuellement, en particulier dans les hautes terres de l'Ouest et du Sud. Ce n'est qu'à partir des années 1970 que le gouvernement, avec l'aide internationale, a commencé des actions régionales et nationales pour conserver l'eau et les sols (Kebede Tato and Hans Hurni, 1992). Dès 1974, Hurni et al. (1978, 1982, 1993) ont développé des recherches et testé divers aménagements à l'échelle de parcelles et de bassins versants. Ces résultats offrent une possibilité unique de base de données pour une étude faite par Kaspar Hurni et al (2015), à l'échelle de toutes les terres cultivées du pays, sur l'extension des sols dégradés par l'érosion hydrique, sur le coût et les bénéfices de l'introduction de techniques durables de restauration des sols cultivés. L'unité de surface dans cette étude est le pixel (30m x 30m) qui sert aussi à évaluer le couvert végétal sur les images *Landsat*. L'enquête couvre 600 000 km² soit 54 % du territoire national dont 57 % sont considérés alloués à la céréaliculture.

2. Le milieu et les structures antiérosives

Hurni (1986, révisé par Hurni et al., 2016) a classé les techniques antiérosives conseillées en Ethiopie en fonction de l'altitude, du climat et des sols cultivés sur 9 zones principales:

Wet and moist WURCH, en haute montagne (alt. 3200 à 3700 m) avec des pluies de 900 mm à plus de 1400 mm ; les cultures sont réduites à l'orge et parfois aux pommes de terre. Les problèmes de ruissellement et d'érosion sont fréquents vu les pluies abondantes sur les sols noirs argileux ou dégradés (bruns ou gris superficiels). On suggère d'améliorer les terrasses traditionnelles et les fossés de drainage existants. Les prés sont généralement bien établis, mais les arbres croissent lentement vu les basses températures (7-12 °C). Sur les pentes de <15 %, on peut introduire des bandes enherbées sur les sols drainant, avec des drains jusqu'aux chemins d'eau (*waterways*) et sur les sols argileux des banquettes de diversion (*graded bund*) bien végétalisées ou des aires de protection si les sols sont trop superficiels. Sur les pentes de 15 à 50 %, après la stabilisation des axes de drainage, on peut construire des banquettes de diversion évoluant en terrasses (*bench terraces*) dont l'espace est calculé en fonction de 2,5 fois l'épaisseur du sol. Les ravins doivent être végétalisés après leur

stabilisation par des seuils. Si la pente est >50 %, il est conseillé de transformer ces terrains en prairies ou en forêts protégées du bétail (*area closure*).

Arbres conseillés: *Erica, Hypericum, Cupressus, Eucalyptus, Schinus*

Herbes: *Festucca, Poa, Danthonia et légumineuse Trifolium*

Wet and Moist DEGA, en moyenne montagne (alt. 2300 à 3200 m) avec des pluies de 900 mm à plus de 1400 mm en une à deux saisons ; c'est une zone de culture intensive (orge, blé et légumes) à sols bruns limono-argileux dégradés et à ravines fréquentes, surtout dans les colluvions de bas de versants. Les problèmes de surplus de ruissellement surviennent sur les champs cultivés, les prairies sur-pâturées et les sols superficiels. Les arbres ne sont présents qu'autour des habitations (eucalyptus). Sur les pentes de <15 %, on peut installer des bandes enherbées ou des haies vives (*alley cropping*) et améliorer le drainage par des fossés qui rejoignent les axes de drainage. Sur les sols argileux, on peut installer des banquettes de diversion ou des *fanya juu* (une structure où l'accumulation du sol s'est faite en amont du fossé) ou des arbres sur les sols trop peu profonds. Sur les pentes de 15 à 50 %, après avoir renforcé les axes de drainage, les ravins et toutes les structures doivent être recouvertes d'herbes ou d'arbres. Les pentes de plus de 50 % doivent être transformées en pâtures ou en forêts protégées avec fauchage de l'herbe et enrichissement en arbres (sur cuvettes ou micro-bassins). En aval des zones dégradées, prévoir un fossé de garde pour protéger les champs cultivés en aval.

Arbres adaptés : *Juniperus, Olea, Nuxia, Pinus, Cupressus, Eucalyptus, Acacia, Celtis, Hagenia, Euphorbia, Schinus, Syzygium*

Herbes : *Andropogon, Panicum, Snowdonia, Poa, Vulpia*

Légumineuses : *Trifolium + légumineuses locales*

Wet and Moist WEYNA DEGA, en basse montagne (alt.1500 à 2300 m), pluies de 900 mm à >1400 mm en 1 à 2 saisons, T° de 18 à 25°C. C'est l'une des meilleures régions pour développer l'agriculture (blé, maïs, tef, sorghos dans les zones sèches et « inset » ou faux bananier, autour des cases). Les sols sont profonds, brun-rouges, limono-argileux, acides et + ou – filtrants. Sur les replats on trouve des argiles noires difficiles à aménager à cause d'un mauvais drainage. Les prairies se développent bien, mais ont un problème de ravinement. Il reste quelques forêts et les arbres se développent bien. Avant tout, il faut renforcer les chemins d'eau. Sur les pentes de <15 %, on peut installer des bandes d'herbes ou des haies d'arbustes (*alley cropping*) si les sols sont filtrants. Pour les sols argileux leur préférer des banquettes ou des *fanya juu* de diversion. Pour les pentes de 15 à 50 %, installer des banquettes de diversion ou des *fanya juu* qui pourront se transformer en terrasses progressives au cours des entretiens. Toutes les structures devront être végétalisées et les ravins munis de seuils avant végétalisation. Les prairies et les forêts dégradées devront être

protégées et enrichies. En amont des ravins et des cultures, prévoir des fossés de protection.

Arbres adaptés : *Juniperus, Podocarpus, Cordia, Ficus, Erythrina, Olea, Celtis, Acacia, Polyscias, Albizzia, Pinus, Eucalyptus, Cupressus, Leucaena, Grevillea, Sesbania*
Légumineuses : *Trifolium, Lablab, Stylosanthes, Desmodium, Sesbania, Calliandra callothyrsus* **Herbes :** *Hyparrhenia, Themeda, Panicum, Pennisetum, Chloris, Cenchrus*

Dry WEYNA DEGA, en basse montagne (1500 m à 2300 m), les pluies sont limitées de 300 à 900 mm avec des sécheresses fréquentes. Vu la longue histoire agraire, les terres sont fortement dégradées sur les collines ravinées, mais accumulées dans les vallées. Les sols bruns-jaunes sablonneux exigent des aménagements pour conserver assez d'eau. Les prairies, sur-pâturées par les chèvres, sont très dégradées et il ne reste plus que quelques arbres. Si on trouve quelques terrasses traditionnelles, commencez par les surélever, les compléter et les végétaliser. Sur les pentes de <15 %, installer des banquettes ou *fanya juu* d'infiltration totale. Si le sol est trop superficiel, installer une zone protégée avec un drain en aval pour protéger les cultures en aval. Sur les pentes de 15 à 50 %, installer des banquettes ou *fanya juu* d'absorption totale à relever à chaque entretien jusqu'à ce qu'elles forment des terrasses progressives. Dans les zones les plus sèches dans les vallées faire directement des terrasses en gradins. Toutes ces structures peuvent être construites en pierres car l'herbe a du mal à couvrir le sol. Les versants de plus de 50 % de pente doivent être convertis en prairies ou forêts. Les ravins seront munis de seuils et revégétalisés.

Arbres conseillés : *Juniperus, Olea, Euphorbia, Prosopis, Schinus, Casuarina, Balanites, Albizzia, Acacia*

Légumineuses: *Lablab, Stylosanthes*

Herbes: *Cenchrus, Chloris, Panicum, Phalaris, Setaria, Sorghum*

Moist and dry KOLLA, sur les collines (alt. 500 à 1500 m), les pluies atteignent 900 à 1400 mm, mais seulement 300 à 900 mm si *DRY KOLA* où les sécheresses sont fréquentes. Les sols des collines sont lessivés, peu humifères et profondément altérés, rouges, limono-argileux sur les pentes et des argiles noires dans les vallées. On observe des problèmes de fertilité des sols érodés sur pente : les cultures (*sorgho, tef, coton, dagussa*) font souvent l'objet d'attaques par des insectes et des maladies. Dans cette zone des «*Eastern lowlands*», les terres conviennent à de nombreuses cultures mais manquent souvent de disponibilité en eau : d'où la fréquence des terrasses traditionnelles pour conserver l'eau des pluies trop rares. Le ravinement en liaison avec le surpâturage dans cette zone est lié aux activités des nomades. Tout d'abord sur des pentes de <15 %, si le sol est sableux et perméable appliquer les structures isohypses d'infiltration totale; mais si les sols sont argileux restaurer les axes de drainage, puis les structures de diversion (banquettes ou *fanya juu* en pente douce vers

l'axe de drainage). Mélanger les arbres aux cultures pour améliorer la couverture du sol. Sur les pentes de 15 à 50 %, sur les sols brun-rouges perméables construire les banquettes d'infiltration totale, mais si les sols sont rouges et argileux, construisez d'abord des axes de drainage, puis des structures de diversion que vous transformerez en terrasses lors des entretiens. Revégétalisez les structures et aménagez des seuils sur les ravins. Contrôlez le pâturage et enrichissez les parcours et les forêts après les avoir mis sous protection contre le bétail : la récolte de fourrage manuel est permise.

Arbres conseillés : *Acacia, Moringa, Ailanthus, Parkinsonia, Schinus, Albizzia, Azadirachta, Pinus, Casuarina, Eucalyptus, Leucaena, Cajanus, Sesbania, Ziziphus, Balanites, Prosopis*
Légumineuses : *Lablab, Stylosanthes, Atriplex, Macroptilium, Cajanus* -
Herbes : *Cenchrus, Chloris, Panicum, Pennisetum, Setaria, Sorghum, Phalaris*

3. Discussion

Ce manuel regorge de conseils pratiques pour aménager les pentes (de >15 % à >50 %) de neuf zones cultivées, classées en fonction de l'altitude (de 500 à 3700 m), des sols et de la pluviosité (de <900 à >1400 mm). Dans les zones souffrant de la sécheresse, il conseille diverses terrasses, banquettes, fossés d'absorption totale des pluies. Si le problème réside dans l'excès d'eau temporaire (sols peu perméables ou tempêtes tropicales) il suggère les banquettes et fossés de diversion vers des exutoires aménagés (seuils et végétalisation). Si le sol est trop peu épais, dégradé ou trop pentu (>50 %), il suggère la transformation des terres en zones protégées, prairies ou forêts où le fourrage peut être récolté manuellement à maturité et le ruissellement absorbé dans des cuvettes ou des fossés de diversion pour protéger les cultures en aval. Le premier souci de l'aménagiste sera d'améliorer, couvrir et enrichir en légumineuses et en arbres les structures traditionnelles existantes (terrasses, ravines, chemins d'eau et exutoires). Sur les pentes modestes (<15 %) on peut se satisfaire de bandes enherbées ou de haies vives.

Mais la tâche et les besoins sont immenses: comment décider que telle zone est prioritaire et qu'il faut choisir telle structure pour gérer l'eau de façon rentable? Le projet de Kaspar Hurni et al. (2015) a choisi un modèle pour exploiter la base de données accumulées pour tenter de résoudre ces problèmes à l'échelle du pixel ou de la région.

4. Evaluation économique de la dégradation des sols par érosion en fonction des structures, de la fertilisation et du recouvrement par des fourrages des talus et autres structures.

Cette étude réalisée par Kaspar Hurni et al. (2015) fournit un état des lieux sur image *Landsat* à l'échelle du pixel (30 m x 30 m) de la dégradation des sols par l'érosion hydrique ainsi qu'un bilan du coût et des bénéfices apportés par trois types d'aménagements durables. L'étude couvre 600.000 km² soit 54 % du territoire Éthiopien, dont 215.000 km² sont cultivés (soit 239 millions de pixels). Les zones basses semi-arides n'ont pas été considérées car ils n'ont pas de terres cultivées pluviales où l'érosion des sols est la plus intense. Des petits groupes de l'équipe du projet se sont impliqués dans l'évaluation économique des services écosystémiques et de leur importance pour le bien-être des populations, en particulier la productivité des terres mises en valeur par de petits fermiers. Pour cette analyse économique, les chercheurs ont soumis les terres à différents scénarios d'aménagement durable pour les trente années à venir. D'autres fonctions écosystémiques, comme la fourniture d'eau et de sédiments aux basses terres, la longévité des réservoirs et des autres impacts hors site n'ont pas été évalués. Ces omissions entraînent probablement une sous-estimation des bénéfices de ces interventions.

L'érosion et la sédimentation ont été estimées à l'échelle du pixel en utilisant les informations des experts et le modèle «*Unit Stream Power Erosion Deposition*» (USPED ; Mitasova et al., 2001) lequel intègre certains paramètres du modèle USLE (Wischmeier et Smith, 1960) adaptés aux conditions Éthiopiennes (Hurni, 1987) et validées par les données d'anciennes stations de recherche (Hurni, 1982) et sur le bassin du Nil Bleu. Ces adaptations ont permis d'estimer l'érosion / la sédimentation pour toute la zone cultivée pluviale et même de prévoir l'érosion/sédimentation en fonction de 30 années d'investissement selon divers scénarios, sans tenir compte du changement climatique, ni de l'extension des cultures avec l'expansion démographique. Grâce à USPED, on a pu estimer l'érosion et la sédimentation moyenne à 18 t/ha/an malgré les structures déjà existantes (18% des terres cultivées de > 8% de pente) et à 12 t/ha/an si toutes les terres de >8% de pente sont couvertes des structures adaptées. Ces valeurs montrent qu'il est nécessaire et possible de réduire l'érosion à des valeurs acceptables grâce à la mise en place généralisée de structures sur les terres cultivées.

Grâce à l'analyse systématique des images et leur interprétation par les experts, il a été possible de distinguer 30 couvertures végétales des terres (systèmes agroforestiers et prairies plus ou moins dégradées, cultures annuelles ou pérennes, jachères ou terres labourées ou résidus de culture laissés en surface, *mini-tillage*, haies vives, etc.) et de leur attribuer un coefficient (facteur C) de 0,01 à 0,17 par rapport à l'érosion des sols nus, et un coefficient (facteur K) de 0,09 à 0,225 dépendant du type de sols et de la zone agro-écologique. C'est ainsi qu'on a constaté l'extension des terres cultivées ces trente dernières années où la population a doublé. On a tenté d'estimer la surface couverte par des structures linéaires sur les images de *Google Earth*, sans succès: le projet a alors mis en place une expertise basée sur les structures existantes et les pentes des terrains. La résistance des sols à l'énergie des pluies a été évaluée sur parcelles nues témoins (où K varie de 0,1 à 0,25). Par contre, l'évaluation du facteur topographique USLE pose un problème : la

longueur de pente sur un pixel a été remplacée par la distance au sommet du versant.

- Après avoir estimé l'érosion/la sédimentation pour quatre scénarios (aucun changement ou extension des structures sur toutes les terres cultivées sur pente de >8 %, avec ou sans changer la fertilisation, la production des cultures a été estimée pour une période de trente ans), basée sur la relation existante entre la profondeur du sol et le rendement. Si on ne change rien, cette analyse montre une diminution des rendements de plus de 5 % entre 2014 et 2045;
- Si on augmente la fertilisation sans changer les structures, on obtient une augmentation de 3 % des rendements après 30 ans ;
- Si on augmente les structures sans changer la fertilisation, on obtient une augmentation de 0.08 % des rendements après 30 ans ;
- Si on augmente la fertilisation et les structures, on obtient une augmentation de 10 % du rendement en céréales. Même si cet impact est modéré, ce modèle montre qu'il est possible de maintenir la production du pays pendant 30 ans, alors que si on ne fait rien, cette production diminue.

La rentabilité de chaque aménagement a été estimée par la comparaison du coût et des bénéfices selon huit scénarios (les 4 précédents X avec ou sans plantation de fourrage sur les structures). Le recouvrement des structures par des cultures fourragères augmente les revenus: d'autres options existent (arbres fruitiers ou légumes de haute valeur) mais n'ont pas pu être pris en compte par manque de données. Supposant un intérêt de 12,5 %, le bénéfice net a été calculé pour chaque pixel et chaque unité administrative. La combinaison des structures + apport d'engrais et couverture fourragère est partout rentable, mais à des niveaux différents. Au Tigray, où les structures couvrent déjà une bonne partie des terres, seule la couverture de fourrage est rentable. Sur les sols superficiels de la région Amhara, l'application d'engrais ne peut compenser le prix des engrais. Ailleurs, l'application des trois aménagements est la solution la plus rentable. Enfin, pour prioriser les subsides et encouragements, il est apparu que les zones à faible production à cause d'une forte érosion, méritent d'encourager le meilleur aménagement avec des subsides, plus que les régions peu érodées où les populations peuvent investir eux-mêmes, sans appui par le gouvernement. Ce sont les conclusions extraites de cette base de données (K. Hurni et al., 2015). D'un autre point de vue, Roose propose de traiter d'abord les terres les meilleures qui vont réagir le mieux aux investissements, donc encourager les paysans, plutôt que les mauvaises terres qui lâchent peut-être plus de terre érodée (sédiments) mais dont il est difficile d'obtenir de bons rendements (Rishirumuhirwa et Roose, 2017).

5. Discussion

A l'époque, le manuel (Hurni, 1986, révisé par Hurni et al., 2016) était en avance par rapport aux techniciens classiques en insistant sur trois idées de base: toutes les structures doivent tenir compte de la diversité du milieu physique, des techniques traditionnelles et sécuriser les structures mécaniques par des végétations adaptées. Mais il ne tient pas compte du coût en travail pour l'installation et l'entretien des structures physiques, ni du coût des fertilisants organiques et minéraux nécessaires pour restaurer la productivité des terres aménagées, ni de l'impact possible du travail du sol et du système de culture sur la production, le bilan hydrique et minéral. En dehors des zones où la pression sur la terre est-telle qu'il s'agit de trouver les moyens de survivre et de profiter des subsides apportés par les ONG ou les Etats, on a observé que les bénéficiaires des projets encouragés par l'étranger n'entretenaient pas les structures anti-érosives «Pourquoi dépenser tant de travail pour conserver des sols dégradés si les structures n'augmentent pas la production des sols où se tassent souvent plus de 5 personnes sur moins d'un hectare» (Roose , 1994).

Depuis l'atelier de Puerto Rico (mars 1987), les spécialistes de diverses régions ont beaucoup réfléchi aux causes de l'échec de 75% des grands projets de conservation des sols (Hudson, 1991; Shaxson, Hudson, Sanders, Roose et Moldenhauer, 1989). En dehors des erreurs techniques, il est apparu que si les structures sont utiles pour maintenir les sols en place, il faut prévoir l'influence majeure du couvert végétal, de la gestion des matières organiques donc de la préparation et de la restauration de la fertilité des sols pour faire accepter et entretenir les aménagements antiérosifs.

Le second rapport (K Hurni et al., 2015) tient compte de la plupart des remarques faites ci-dessus. Il apporte une riche synthèse des travaux de toute une équipe de chercheurs dans les montagnes cultivées de l'Ethiopie. Cette modélisation permet d'évaluer les risques d'érosion et de choisir les zones à traiter en priorité en tenant compte de l'impact de l'érosion sur les bassins versants et de l'importance de la fertilisation sur les bénéfices à tirer de ces investissements et sur l'acceptabilité par les paysans, à une résolution d'un pixel (30m x 30m). Il n'a pas été possible d'intégrer tous les effets des structures à l'aval (off-site): les bénéfices réels sont donc probablement plus importants que ceux annoncés.

A l'échelle de l'exploitation (souvent < d'un ha), il devrait donc être possible d'analyser le bilan financier en tenant compte de toutes les opportunités de production, des systèmes agro-forestiers et de l'élevage en fonction de la demande et de la densité des populations, de la distance des villes et des marchés organisés. L'érodibilité et la productivité des sols dépendant de ses matières organiques, il faudrait analyser la place à réserver à la gestion de la biomasse produite (haies vives, arbres, déchets ménagers transformés en fumier, compost, paillage, ou énergie) pour optimiser les systèmes de production intensifs (Rishirumuhirwa, 1996). Ndayizigiye et König au Rwanda ont montré aux chap. 10 et 12 le rôle majeur des arbres associés aux cultures pour la production de biomasse, de bois de feu et la redistribution des

nutriments à la surface du sol. Rishirumhirwa, Duchaufour et Roose ont souligné le rôle du bananier dans la restauration des MO et des nutriments du sol au Burundi (voir chapitre 13). Il serait souhaitable de compléter ces deux documents de base par l'analyse des interactions entre les systèmes d'élevage et de culture et les risques d'érosion sur ces fortes pentes soumises à des pressions foncières remarquables.

6. Conclusions

En Ethiopie, la recherche a accumulé depuis 40 ans une masse impressionnante de données et d'informations sur l'érosion à l'échelle de la parcelle ou des bassins versants. Cela a permis dans un premier temps de rédiger un manuel décrivant en détail les structures antiérosives et ensuite permettant de réduire les risques d'érosion sur 230.000 km² de terres cultivées, de pentes de >8 à > 50%, des sols perméables ou non, une trentaine de couverts végétaux et sous des pluies de 300 mm à >1400 mm, à des altitudes de 500 m à plus de 3700 m, et de décider les zones prioritaires restant à traiter en vue du bien-être des petits paysans. L'analyse des scénarios montre que si on laisse la situation en l'état, dans 30 ans les terres vont se dégrader et le bilan sera négatif. Par contre, si on étend l'usage adéquat de fertilisants (organiques et minéraux) au bout de trente ans on aura une augmentation de rentabilité de 3 % et si en plus on recouvre les structures de plantes fourragères sur toutes les terres cultivées, on obtiendra une amélioration de 10%. Ces bénéfices peuvent paraître bien modestes pour l'effort fourni mais montre au moins que l'on pourrait nourrir toute la population malgré la croissance démographique impressionnante, et aussi qu'il est nécessaire de compléter les engrais organiques par des compléments minéraux d'autant plus importants qu'on vise une production vivrière intensive.

Bibliographie

- Hurni H., 1978. Soil erosion forms in the Simen Mountains - Ethiopia (with map 1:25,000). *Geographica Bernensia*, G8, p. 93-100
- Hurni H., 1982. Soil Conservation Research Project, Ethiopia. Inception Report, Vol. 1. Bern and Tokyo: University of Bern, Switzerland and The United Nations University, 51 p.
- Hurni H., 1986. Soil conservation in Ethiopia. Guidelines for Development Agents. Addis Abeba: Community Forests and Soil Conservation Development Department (CFSCDD), Ministry of Agriculture, 100 p.
- Hurni H., 1993. Land degradation, famine, and land resource scenarios in Ethiopia. Paper presented to the National Conference on a Disaster Prevention and Preparedness Strategy for Ethiopia, December 5-8. Addis Abeba, 31 pp. Published in: World soil erosion and conservation. Cambridge studies in applied ecology and resource management, p. 27-61.
- Hurni H., 1987. Erosion - productivity - conservation systems in Ethiopia. In: Pla Sentis I (eds). Soil Conservation and Productivity. Proc. of the 4th Int. Soil Conservation Conference, Maracay, Venezuela, pp. 654-674

- Hurni H, Berhe WA, Chadhokar P, Daniel D, Gete Z, Grunder M, and G Kassay,. 2016. Guidelines for Development Agents on soil and water conservation in Ethiopia. Second revised edition. Bern, Switzerland: Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern with Bern Open Publishing (BOP). 134 p.
- Hurni Kaspar, Zeleke G, Kassie M, Tegege B, Kassawmar T, Teferi E, Moges A, Tadesse D, Ahmed M, Degu Y, Kebebew Z, Hodel E, Amdihun A, Mekuriaw A, Debele B, Deichert G, Hurni Hans, 2015. Economics of Land Degradation (ELD) Ethiopia Case Study. Soil Degradation and Sustainable Land Management in the Rainfed Agricultural Areas of Ethiopia: An Assessment of the Economic Implications. Report for the Economics of Land Degradation Initiative. Available from: www.eld-initiative.org. 94 p.
- Hudson NW. 1991. A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin* n°64, Rome: 65 p.
- Kebede Tato and H Hurni, 1992. Soil conservation for survival. SWCS, Ankeny : 1-9
- Liniger H. and W. Critchley, 2007. Where the land is greener: case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. Edit. WOCAT, CTA, FAO UNEP, CDE, 364 p.
- Mitasova H, Brown WM, Hohmann M, and S Warren, 2001. Computing USPED using GIS. Retrieved May 2014, from http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/Models%20and%20Processes/USPED/ArcMap/ArcMAP_computing_usped_using_gis1.htm
- Rishirumuhirwa Th., 1996. The contribution of banana farming system in sustainable landuse in Burundi. 9ème ISCO Conference, Bonn, 10 p.
- Rishirumuhirwa Th, Duchaufour H, E. Roose, 2021. La gestion des bananiers pour améliorer la fertilité des sols du Burundi. In «Pour une agriculture tropicale raisonnée ; synthèse de la GCES en zone de montagne très peuplées.». E.Roose Eds, éditions IRD Montpellier, 10 p., sous presse.
- Roose E., 1976. Use of the USLE to predict erosion in West Africa. In: Soil erosion: prediction and control. SCSA, special publication N° 21: 60-74.
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO* n° 70, Rome : 420 p.
- Roose E, Sabir M, Laouina A., 2010. Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Editions Marseille, 343 p.
- Roose E., 2017. « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens: contribution à l'agroécologie » IRD Editions, Montpellier, 711 p.
- Shaxson F, Hudson NW, Sanders D, Roose E., and W. Moldenhauer, 1989. Land husbandry, a framework for soil and water conservation. SWC Soc. Ankeny, Iowa, 64 p.
- Wischmeier W.H. and D.D. Smith, 1960. A Universal Soil-Loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. Transactions of 7th International Congress of Soil Science, Madison. 1: 418 – 425.

Chapitre 21

Erosion dans les Andes

Trois approches de gestion de l'eau et des sols en fonction des conditions socio-économiques

Christophe De Jaegher, George De Noni et Eric Roose

1. Problématique : gérer l'eau, la biomasse et les nutriments pour une production vivrière durable

Le Pérou est formé de trois zones principales : la plaine côtière très aride le long de la côte du Pacifique, la cordillère andine humide et la zone amazonienne très humide. Dans ce chapitre, nous comparerons trois systèmes de production agricole sur la cordillère des Andes, situés entre 1200 et 3800 m d'altitude, développés à des époques historiques différentes. Ces systèmes tentent de maîtriser la gestion des eaux superficielles, la production vivrière et la durabilité d'un milieu particulièrement agressif (pluies de 400 à plus de 900 mm, des cultures couvrant mal le sol sur des pentes souvent très fortes), en fonction du cadre socio-économique.

2. Les aménagements construits au XV^{ème} siècle par les Incas

Sous la direction des Incas, des aménagements complets de bassins versants ont été réalisés par la population conquise (voir autour de Cusco, la Vallée Sacrée et Machu Picchu). Il s'agit de **terrasses en gradins très sophistiquées** aménagées pour irriguer des versants très pentus (20 à 80 %) et pour drainer les excès pendant les pluies orageuses afin d'éviter le ravinement et les glissements de terrain. Pour alimenter ces terrasses, **des canaux en section triangulaire** captent les eaux des plus hautes montagnes provenant des steppes herbeuses d'altitude ou localement de la fonte des neiges (> 4800 m) et les dirigent, sans éclaboussure et parfois sur des aqueducs au-dessus des ravins, vers les champs de maïs (altitude de 2400 et 3500 m), pois, orge, blé, fèves et autres cultures de montagne. Ces canaux nourrissent parfois des **bassins de stockage** pour régulariser le débit d'irrigation et réchauffer les eaux. Les terrasses sont construites en courbes de niveau derrière des murs épais construits en blocs de roches taillés soigneusement et transportés depuis des carrières situées parfois à plusieurs km. Ces **terrasses en gradins** exigent énormément de travail pour tailler les blocs, les transporter, puis les retailler afin de les poser sans ciment sur des murs de 1 à 3 m de hauteur, restés stables depuis le XV^{ème} siècle malgré les nombreux tremblements de terre. Leur astucieux mode de drainage, l'imbrication des blocs très lourds et l'absence de tout arbre, expliquent en partie la réussite de ce travail de titan. Alors qu'en Chine le terrassement en

gradins de pentes de 25% sur loëss épais de plusieurs mètres ne demande que 300 à 500 hommes x jours, au Maroc sur colluvions mélangées de blocs rocheux, il faut 1000 à 1200 he x jours, au Rwanda, en absence de roche, les murs sont construits en mottes d'herbes (800 à 1200 he x jours/ha) et au Pérou pour tailler et construire de tels murs, il faut compter plus de 2000 hommes x jours pour assurer un travail si précis. Il faut encore ajouter le temps d'entretien (50 à 300 jours/ha). On comprend qu'aujourd'hui, rares sont les endroits où on construit ces murs à vocation agricole et on leur préfère des terrasses progressives où la majorité du déplacement des terres se fait par le travail annuel de la surface du sol (érosion aratoire et érosion en nappe) en amont des haies, bandes enherbées et autres lignes de défense des sols (Roose, 1994, 2017).

3. Le système de production traditionnel dans les Andes de Piura (De Jaegher, 1992).

Le système primitif décrit dans la région de Piura au Nord-Ouest de la chaîne andine se retrouve encore aujourd'hui entre 1200 et 2400 m d'altitude sur des versants à forte pente (20 jusqu'à 80 %). Cette région est affectée par les précipitations liées au phénomène climatique el niño. Les pluies tombent au cours d'une seule saison qui s'étend habituellement sur 5 mois et varient beaucoup autour de 900 mm. Il n'est pas rare d'observer des précipitations supérieures à 1200 mm/an : elles peuvent même atteindre 3000 mm lors d'années exceptionnelles (1983). Les brouillards sont fréquents et constituent un facteur phytosanitaire important pour de nombreuses cultures. La température varie beaucoup avec l'altitude. A 1500 m d'altitude, la moyenne minimale est de 11°C et la moyenne maximale est de 24°C.

Jusqu'à la première moitié du XX siècle, le système de production dans cette région se basait sur l'élevage extensif du bétail (surtout bovin) et accessoirement sur une agriculture vivrière sur brûlis (du maïs principalement, mais aussi des pois, de l'orge et du blé). Les grands propriétaires qui contrôlaient la plus grande partie de ces territoires, limitaient le nombre de paysans autorisés à cultiver des lopins de terres sur leurs vastes domaines. La mise en culture se faisait sur des terrains longuement reposés (jachères pâturées) couverts d'une importante strate d'herbes, d'arbustes et de quelques arbres. Ces parcelles aux sols profonds, riches en matières organiques et assez fertiles étaient nettoyées de la végétation herbacée et arbustive, qui était ensuite brûlée. Les arbustes n'étaient habituellement pas dessouchés. On laissait en place les quelques arbres présents sur les parcelles après les avoir éventuellement éclaircis. La première culture installée après le brûlis de la végétation était le maïs semé en poquets sans travail du sol en décembre dès les premières pluies. Après quelques semaines on éliminait les mauvaises herbes à l'aide d'une pelle avec laquelle on raclait la surface du sol et on rassemblait les mauvaises herbes autour des plants de maïs. Un second désherbage avait lieu 6 à 8 semaines plus tard à l'aide d'une lame de machette fixée

au bout d'un manche en bois de 60 cm de long (*mischa*). Cet outil était utilisé pour couper les adventices, souvent très abondantes, à quelques centimètres sur la surface du sol, sans les déraciner. Elles constituaient alors un paillage qui contribuait au contrôle du ruissellement et de l'évaporation.

Après une première campagne de maïs, les parcelles étaient ensuite cultivées pendant 2 ou 3 années avec du maïs, de l'orge, du blé ou des pois. Pour ces trois dernières cultures, semées en mars, deux à trois mois après le début de la saison des pluies, le sol était préparé très grossièrement avec une araire ou une barre à mine laissant de grosses mottes à la surface des champs, favorisant l'infiltration des pluies souvent intenses en cette période de l'année. Les récoltes terminées, les parcelles étaient laissées en pâture au bétail jusqu'aux semailles de la campagne suivante.

Après quelques années de culture, les parcelles étaient utilisées comme pâturage pendant 5 à 10 ans. La végétation arbustive naturelle envahissait peu à peu les terrains en jachère, ce qui permettait de reconstituer une fertilité suffisante pour entamer un nouveau cycle de culture.

Suite à la réforme agraire (1970), les terres ont été cédées aux anciens ouvriers des haciendas. Depuis lors les besoins monétaires de la population ont augmenté considérablement et les cultures vivrières ont pris nettement plus de place dans l'occupation des sols : la durée des jachères s'en est trouvée réduite. Des signes d'érosion se sont manifestés, y compris par endroit sous forme de ravines. En conséquence, une baisse de la fertilité des sols et une diminution significative des rendements agricoles sont observées ; les rendements en maïs, par exemple, dépassent rarement 1000 kg par ha. Pour la majorité des ménages, qui ne détiennent que de 2 à 3 têtes de bovins, faute de disponibilité en pâturages, l'élevage ne constitue désormais plus qu'une caisse d'épargne et une ressource alimentaire d'appoint grâce à la production saisonnière de lait.

Sur la majorité des bassins versants, la disponibilité en eau pour l'irrigation est faible. De petits réservoirs communautaires pouvant retenir quelques dizaines de mètres cubes ont été aménagés afin de pouvoir mieux gérer le peu d'eau disponible pour l'irrigation en saison sèche. Elle est utilisée pour irriguer de petites surfaces de prairies permanentes de graminées (*Paspalum fasciculatum*) afin d'assurer un minimum de fourrage vert en saison sèche et pour la production de quelques ares de cultures permanentes (caféiers, bananiers et arbres fruitiers) ou des cultures vivrières de saison sèche tel que le haricot ou la pomme de terre.

Le plus souvent le bétail est mis en prairie attaché à une corde : les femmes et les enfants sont chargés de les déplacer dans la prairie au moins deux fois par jour et en saison sèche de les emmener à l'abreuvoir à de rares points d'eau permanents. Aucune famille ne pratique l'élevage du bétail en stabulation. La disponibilité de fumier pour l'épandage sur les parcelles agricoles est donc très réduite. Le peu de fumier disponible est utilisé sur les petites parcelles irriguées.

La fertilisation introduite vers la fin des années 1980 se limite à l'épandage de faibles doses d'urée, principalement sur le maïs tout au plus une cinquantaine d'unités d'azote par hectare. L'usage de fertilisants azotés, en application locale au moment du 1^{er} désherbage, s'est peu à peu généralisée au cours du temps et la plupart des producteurs ont été contraints d'en faire usage pour obtenir des rendements acceptables.

En montagne, l'érosion aratoire lors du labour et des sarclages peut être importante. En Algérie, (station INRF de Médéa) dans un verger d'abricotiers labouré deux fois par an, l'érosion aratoire a déplacé 30 cm de terre en trente ans soit environ 135 t/ha/an. En Equateur, l'érosion aratoire a accumulé 130 cm de terre derrière une murette en 2 ans (soit 40 t/ha). En Côte d'Ivoire, Rwanda et Burundi, il suffit de 4 à 5 ans pour construire un talus de 1 m : un labour en courbe de niveau sur 100 m déplace environ dix tonnes et un sarclage une t/ha/an de terre (Roose, 1994). Par contre le zéro-labour sur litière (comme à Piura), ne déplace guère de terre.

4. Propositions pour la mise en place de haies vives

Le défi à relever est de développer un système de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) tout en intensifiant la production agricole pour faire face à une population croissante, qui a des besoins accrus de revenus monétaires de par son intégration grandissante au marché. Les auteurs pensent qu'il faudrait reconsidérer la présence des arbres et arbustes dans le paysage. Il s'agirait d'implanter des haies vives en courbes de niveau dans les champs à distance variable selon la pente. Ces haies pourraient être constituées de diverses espèces autochtones à usages multiples : fourrage, fixation des sols contre les mouvements de masse, étalement des eaux de ruissellement, filtration des terres érodées, paillage, fertilisation par fixation de l'azote de l'air par des légumineuses et retours des nutriments emportés par les eaux de drainage, fruits comestibles, médicaments et combustibles. On a proposé des espèces comme *Acacia macrocarpa*, *Erythrina sp.*, *Caesalpinia sp.*, *Leucaena leucocephala*, *Escallonia*, *Annona cherimola*, *Agave sp.* Ces haies pourraient alterner avec des bandes enherbées de *Pennisetum purpureum* (espèces déjà cultivées dans la zone depuis la fin des années 80), du vétiver et là où c'est possible elles pourraient être combinées avec des légumineuses herbacées pour améliorer la qualité du fourrage comme *Mucuna* ou *Desmodium* dont les cultures très peu connues dans la zone mériteraient d'être davantage expérimentées. Ces barrières végétales contribueraient à terme à la transformation du paysage en créant des terrasses progressives. Ce type d'aménagements existait déjà par endroit dans la zone, mais il faudrait les généraliser à l'échelle des versants et diversifier les espèces utilisées.

Par ailleurs les paysans font des efforts pour améliorer leur système d'irrigation utilisé en saison sèche pour arroser des cultures vivrières ou des prairies permanentes. Le débit des sources ayant diminué suite au défrichement, il est probable que les haies vives amélioreront la redistribution des eaux vers les nappes et les sources.

Fin des années 1980 et au début des années 1990, des organisations non gouvernementales ont appuyé pendant plusieurs années ces communautés tant sur le plan organisationnel que dans le domaine de la gestion des ressources naturelles et de la production. Un travail

patient de diagnostic participatif a été mené sur les systèmes de production avec les familles, ce qui a contribué à une prise de conscience de l'importance des arbres pour la gestion des eaux et des sols au niveau des bassins versants et des parcelles.

Un premier résultat observé suite à ce diagnostic a été l'adhésion massive de la population à des mesures de protection des forêts communautaires naturelles situées sur les crêtes des bassins versants et dans le piémont en-dessous des zones de cultures.

La mise en place de haies vives telles que mentionnées plus haut faisait également partie des propositions d'aménagements diffusées suite à ce diagnostic. En parallèle une modification du système d'élevage a été adoptée par quelques paysans pilotes en vue d'intensifier les systèmes de production et d'améliorer l'utilisation et le recyclage des matières végétales produites sur l'exploitation. Il s'agissait d'introduire un système de stabulation du bétail dans de petites étables établies à proximité des parcelles agricoles. Le bétail était nourri par des fourrages et résidus de récoltes apportées depuis les champs et le fumier était utilisé pour la fertilisation des parcelles agricoles après avoir éventuellement fait l'objet de compostage avec d'autres matières végétales disponibles. Diverses interventions complémentaires sur les itinéraires techniques étaient prévues pour accompagner l'intensification des productions (fertilisation minérale, amélioration des semences, capacité de stockage des récoltes, etc.)

Malheureusement avec le recul de quelques années nous avons constaté l'abandon d'une bonne partie des techniques d'amélioration de la gestion des sols et de la biomasse introduites avec l'appui du projet ONG. Les agriculteurs de la communauté n'ont que très peu installé de haies vives et les techniques de stabulation du bétail et de fertilisation organique associée ont été abandonnées, probablement par manque de moyen de transport. Nous avons même constaté que des paysans modèles qui avaient été les premiers à adopter ces changements d'itinéraire technique, avaient arraché des haies ligneuses et les bandes enherbées de *Pennisetum* qu'ils avaient installées dans leurs propres parcelles quelques années auparavant. Ils avaient aussi abandonné les pratiques de stabulation du bétail et de gestions des matières organiques associées.

Plusieurs explications ont été apportées par les paysans pour justifier ce retour en arrière. Ils s'étaient rendu compte que ces haies vives occupaient une partie trop importante de leurs parcelles (10 à 20 %), et entraient en concurrence directe avec les superficies disponibles pour leurs cultures vivrières. Ils constataient également que le fait de devoir transporter les fourrages depuis les champs souvent distants et avec des dénivelés très conséquents vers les étables représentait un travail fort lourd pour les ménages et en particulier pour les femmes et les enfants qui ont habituellement la charge de l'alimentation du bétail. Le relief est très accidenté ce qui empêche l'usage de charrettes et seulement une partie des exploitants dispose de bêtes de sommes pour le transport. Les ménages n'avaient pas obtenu de bénéfices justifiant leurs efforts pour appliquer ces nouvelles pratiques et en conséquence les avaient abandonnées. Ils déploraient de plus que leurs champs étaient envahis par le *Pennisetum* qui s'était disséminé dans les parcelles à partir de tiges données comme fourrage au bétail. Finalement ils estimaient que les haies ligneuses établies sur des parcelles en forte pente représentaient un danger d'accident mortel pour les bovins mis en

pâturage car ceux-ci risquaient de coincer leurs cornes entre les branchages et de s'étouffer lors de chutes. Or la perte d'un bovin adulte est une véritable catastrophe pour les ménages qui n'ont accès qu'à de faibles revenus monétaires.

De faibles résultats voire des échecs dans l'introduction de changement technologique en milieu paysans sont fréquents quoique trop rarement documentés. Ce qui interpelle dans ce cas précis c'est que les choix technologiques proposés étaient l'aboutissement d'une réflexion menée par les agents de développement au cours de plus de 2 années de travail et de vie partagée dans les communautés. De plus, les techniques diffusées étaient déjà présentes auparavant dans des communautés voisines et elles avaient fait l'objet d'expérimentation avec quelques producteurs avant de faire l'objet de diffusion.

Nous tirons comme conclusion de cette expérience qu'il est toujours très difficile de prévoir le succès dans l'adoption de modifications dans les systèmes de production agricole traditionnel. Une véritable participation des paysans dans les diagnostics de situation et dans le choix des techniques bien qu'indispensable, n'est pas suffisante pour garantir l'appropriation et la diffusion des changements techniques sur le long terme, même s'ils sont jugés au départ par les paysans et les techniciens du développement comme pertinents et bien adaptés à leurs systèmes de production. Deux éléments doivent être pris en compte. D'une part il est très important que les paysans perçoivent que les efforts réalisés pour introduire les changements techniques soient compensés par des bénéfices tangibles sur le court et le moyen terme. D'autre part, il faut garder à l'esprit l'aversion aux risques des paysans. Une famille modeste aura tendance à éviter d'adopter des options techniques qui pourraient mettre en danger accidentellement son épargne dans un proche avenir.

6. Conclusions pour le Pérou

- L'érosion en nappe est très variable en fonction des systèmes de culture, des techniques culturales et des pluies exceptionnelles.
- Dans le milieu naturel le sol est bien couvert et l'érosion négligeable : par contre le ruissellement augmente dès que la biomasse est pâturée.
- Après le défrichage, si on sème le maïs en poquets sans retourner le sol, laissant aux adventices le soin de couvrir le sol, le risque d'érosion reste négligeable. Par contre dès qu'on labour le sol sans le protéger de l'agressivité des pluies (par paillage ou plantes de couverture), l'érosion devient dangereuse par perte sélective des nutriments et des eaux de ruissellement qui s'organisent rapidement en ravines sur ces fortes pentes montagneuses.
- L'introduction des arbres à buts multiples (fourrage, fruits, médicaments, bois de chauffe, apport de nutriments) réduit les risques d'érosion, surtout s'ils sont menés en haies vives multi-espèces, apportant à moyen terme des bénéfices sensibles pour l'équilibre économique de la famille (fruits, lait, sucre, biodiversité).

- Les cultures pérennes de caféiers, bananiers et Erythrines offrent une certaine protection mais elles doivent être complétées par l'épandage en courbes de niveau des résidus de culture, ou par un sous-étage de plantes de couverture pour absorber toute l'énergie des pluies.
- D'après les expériences menées en Equateur, au Rwanda et Burundi, l'apport de nutriments par la biomasse ne suffit pas pour maintenir la fertilité du sol et la production vivrière : il faut apporter un complément d'engrais minéraux pour obtenir une augmentation importante de la production (Ndayiziguye et al., 1993 ; Rishirumhirwa et al., 2017 ; König, 2017) : cela a été confirmé en Equateur sur des sols volcaniques (De Noni et al., 1993).

7...Etudes dans les Andes équatoriennes.

Problématique en Equateur

L'Equateur est un petit pays, qui tire son originalité d'une mosaïque de paysages comportant une cordillère coincée entre deux plaines basses. Les activités humaines ont dû s'adapter à ce milieu montagnard à fortes dénivelées et à l'évolution de l'histoire et de la population.

Durant les 2000 ans précédant la conquête espagnole, la population peu nombreuse a développé une agriculture diversifiée répartie sur divers étages écologiques avec l'irrigation d'un dense réseau de terrasses. Suite à la conquête espagnole, la guerre et les maladies importées ont réduit la population. Les bonnes terres, sont gérées par les haciendas, vastes domaines agricoles où les indigènes sont traités comme une main d'œuvre servile. Les bonnes terres sont réservées à l'élevage et les pentes aux ouvriers.

Depuis le début du XXème siècle, l'Equateur connaît une formidable croissance démographique. Face au mécontentement croissant de cette population paysanne, le gouvernement a proclamé la réforme agraire forçant les grands propriétaires à céder une partie de leur terroir aux petits paysans (les terres les plus inhospitalières = minifundio). Suite à cette révolution et à la pression démographique (50 à > 200 habitants/ km²), la situation a évolué vers des situations déséquilibrées du fait du développement de petites parcelles vivrières très érodées (minifundio) et de la conquête des terres d'altitude.

L'étude cartographique des principaux processus d'érosion en Equateur (De Noni et al., 1986) montre que 50 % du pays sont affectés par des processus de dégradation des sols :

- Dans le bassin intra andin (1500 à 3000 m), il ne reste que très peu de sols arables. Au Nord et au Centre de ce bassin, on observe une formation épaisse de

cendres volcaniques indurées appelée « cangahua » qui affleure lorsque les sols ont été érodés.

- Sur les hautes terres et les flancs extérieurs des cordillères (3200 à plus de 4000 m) se développe une érosion active à mesure que se déplace le front de colonisation agricole.

Les études d'érosion sur parcelles de 50 à 100 m² ont démontré que l'érosion est très variable d'une année à la suivante : elle peut atteindre 400 à 600 t/ha en quelques pluies intenses, mais peut aussi rester faible (3 à 60 t/ha) lorsque les indices pluviométriques restent modérés (Rusa inférieur à 100) et les sols bien couverts avant les principales averses (De Noni, Viennot, Trujillo, 1989). Malgré la pente, le ruissellement annuel reste modéré (1 à 20 %) pour des pluies annuelles de 366 à 588 mm/an.

Rares techniques antiérosives et déficit alimentaire des petits paysans. Aujourd'hui on peut distinguer deux types d'exploitations : celles des riches propriétaires des haciendas sur les meilleures terres et celles des petits paysans marginalisés, pressés de produire pour survivre dans un milieu difficile. Les petits paysans n'ont pratiquement pas développé de techniques antiérosives capables de protéger les terres sur pentes fortes lors des plus fortes pluies. Par exemple, sur les hautes terres de Chimborazo on peut observer les traces de quelques ouvrages sommaires en haies vives et de petits canaux peu profonds (30 cm) et déclive (20 % de pente) qui ne peuvent canaliser le ruissellement vers les fossés limitrophes sans créer des ravines. De même, les haies vives de *Gybermium* sont disposées de manière aléatoire par rapport à la pente ou bordent les parcelles, mais sont rarement associées à des labours isohypses. On observe aussi l'abandon d'anciens ouvrages agricoles hérités des sociétés précolombiennes, des terrasses en gradins avec des talus de pierres ou des blocs de cendres indurées. A Pimampiro les talus sont rasés pour introduire la moto-mécanisation dans le sens de la pente. A Punin et Florès on peut observer sur des pentes de 60 % vers 3500 m. de larges terrasses en pente séparées par des talus de plusieurs mètres de haut qui servent de limites de propriété. Pour survivre, les petits paysans produisent les aliments de base : des céréales (maïs, blé, orge) et des tubercules (pommes de terre) qui ne permettent pas de développer une agriculture rentable ou durable. La production n'est excédentaire que lors d'une année exceptionnelle. De plus on peut noter que la baisse de la production agricole est générale pour toutes les cultures entre 1970 et 1980, mais plus spectaculaire pour le maïs et le blé.

Propositions d'améliorations. Face à son isolement en montagne, le paysan a besoin de formation à l'agriculture de montagne et à l'usage des engrais, de semences améliorées, de techniques conservatoires de l'eau et des sols. Dans cet esprit, l'ORSTOM (devenu IRD) a développé un programme de coopération avec le Ministère de l'Agriculture Equatorien afin de développer chez les paysans (et cogéré avec eux) des parcelles de 1000 m² où sont

testées différentes améliorations en comparaison avec le témoin traditionnel. Pour contrer l'énergie du ruissellement sur fortes pentes on a testé des ouvrages perméables isohypses simples qui évoluent en terrasses progressives. On a choisi avec les paysans les matériaux qu'il utilise pour renforcer les talus : des mottes de terre (comme au Rwanda), des blocs de cangahua, des bandes enherbées ou cultivées (lupin ou quinoa). Ces systèmes de conservation simples, à la portée du paysannat, et le billonnage en courbes de niveau s'appuyant sur des murets de terre ou des bandes enherbées, ont réduit l'érosion à <1 à 8 t/ha/an, inférieure à l'érosion tolérable 1 à 12 t/ha/an (selon USLE). Les rendements ont aussi été améliorés : A Mojanda, la production de pommes de terre est passée de 4,3 t/ha sur le témoin à 7,6 t/ha sur la parcelle améliorée. Enfin, lors des averses rares, les pertes en terre ont atteint 34 t/ha sur le sol nu labouré et moins de 1t/ha sur la parcelle améliorée. Ces résultats sont encourageants, mais le simple travail à la houe large (asadon) a accumulé 130 cm de terre derrière le muret et creusé d'autant à l'aval du muret précédant, soit une érosion aratoire de l'ordre de 40 t par 100 m de muret alors que l'érosion hydrique en nappe est insignifiante (0,2 t/ha/an). Enfin pour permettre d'améliorer rapidement le rendement en maïs, l'ORSTOM a prêté les engrais nécessaires pour obtenir une production optimale et conserver durablement la fertilité du sol. Cet investissement a été remboursé dès la première récolte et a servi à une autre famille.

8...CONCLUSIONS

- Les Andes constituent un milieu naturel complexe mais propice au développement de plusieurs formes d'érosion qui, en absence d'intervention adaptée au milieu physique et humain, provoque la dégradation de la ressource en eau, sol et biomasse.
- Face aux contraintes dûes au relief et au poids de l'histoire, des petits projets définis par un travail conjoint de la recherche et des paysans peuvent relever le défi d'améliorer significativement à la fois le niveau de vie des paysans et la stabilité de l'environnement.
- De petits financements et un dialogue entre les paysans et les chercheurs ont porté leur choix sur des aménagements simples, à portée des paysans, peu coûteux en temps de réalisation et en matériel. Il reste à démontrer que tous ces efforts pour maîtriser le milieu sont payants à court et long terme.
- Le succès des projets de développement durable exige non seulement des enquêtes préliminaires et des encouragements pendant la durée du projet, mais aussi le suivi et l'encadrement des communautés paysannes.

Bibliographie

De Jaegher Ch., 1992. Gestion des sols dans un système de production paysan des Andes du Nord du Pérou. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 223-228.

De Jaegher Ch., Valverde H., 1991. Tecnologia campesina del maiz. Comunidad Campesina de Simiris, Piura, CEPESER, 169 p.

De Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1989. L'érosion et la conservation des sols en Equateur. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22,2 : 235-245.

De Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1994. L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur. In E. Roose Eds. « Introduction à la GCES ». FAO, Rome, *Bull. Pédol. FAO* n°70, 420 p., p.353-362.

König D., 2017. « Potentialités de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda ». In E. Roose, eds. « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens » IRD Editions, Marseille : 613-624.

Ndayizigiye Fr., 2017. Haies vives de légumineuses arbustives et fumures organiques et minérales complémentaires pour la restauration de la fertilité des sols ferrallitiques acides du Rwanda » In E. Roose., eds, « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ». IRD Editions : 591-604.

Rishirumuhirwa Th., Roose E., 2017. Erosion cumulée et restauration de la productivité d'un sol ferrallitique acide du Burundi. In E. Roose, eds. « Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens », IRD Editions : 211-222.

Roose E., 1994. Introduction à la GCES. *Bull. Pédologique de la FAO*, Rome, N° 70 : 420 p.

Roose E. 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux : contribution à l'agro-écologie ». IRD Editions, 711 p.

Chapitre 22

Gestion durable des ressources dans le bassin de Tazlyda, Haut Atlas, Maroc

Sabir Mohamed et Roose Eric

Situation du bassin de Tazlyda

Tazlyda est le nom donné à la fois à une communauté de la tribu des Mesfioua, à un oued affluent du R'dat (affluent du Tensift) et à une unité administrative « Machiakha » du Haut Atlas marocain, au sud-est de Marrakech, juste avant le col de Tizi n'Tichka.

2. Analyse du milieu humain

Le site Tazlyda fait partie du territoire de la tribu berbère des Mesfioua. La forme d'organisation tribale et ancestrale « Jmaâ » n'existe plus réellement dans aucun des douars. Les paysans parlent de Jmaâ lorsqu'ils sont amenés à gérer des aspects communautaires particuliers comme le tour d'eau, la mobilité des troupeaux, etc. Une forme particulière de cette organisation informelle concerne la gestion des agdals pastoraux et forestiers, la préservation et gardiennage de la production fruitière (noyers) et la qualité de l'eau. Les formes d'organisation modernes telles que les associations de développement des usagers de l'eau potable (AUE), ont été encouragées par les autorités depuis les années 2 000.

L'analphabétisme est presque total chez les générations de plus de 20 ans. Les pères ont émigré à la recherche de travail pour subvenir aux besoins de la famille. Actuellement, presque tous les enfants des douars sont scolarisés. Les ménages de Tazlyda vivent essentiellement des transferts d'argent générés par les enfants et les chefs de foyers émigrés en villes. L'émigration couvre en moyenne plus de 50 % des revenus familiaux. L'émigration a permis aux ménages de construire des maisons en dur. L'électrification est totale. La cuisson est à base de gaz. Mais le chauffage est assuré par le bois de feu « gratuit » collecté dans le matorral de chêne vert.

L'agriculture actuelle contribue très peu au revenu familial. Les céréales (orge et maïs) sont les cultures dominantes. Les rendements sont très faibles à cause de la petitesse de la SAU, l'insuffisance de l'eau d'irrigation et le manque d'utilisation d'intrants. Le revenu agricole est assuré essentiellement par un élevage extensif basé sur de petits troupeaux de caprins et d'ovins vivants dans les forêts en hiver et les pâturages des hauts plateaux en été. La vente des jeunes bêtes de 6 à 8 mois, permet de renflouer la trésorerie des paysans, notamment à l'occasion de la fête de l'Aïd Al Kebir. La conversion du cheptel bovin de race locale en race améliorée (pie noire) a permis aux femmes de produire en moyenne 3 à 10 litres de lait par jour. Quelques paysans ont essayé d'optimiser la production agricole en associant des cultures en sous étages aux arbres fruitiers. Deux paysans conduisent quelques ruchers traditionnels pour la production de miel.

3. Analyse du milieu naturel

Les précipitations moyennes annuelles à Zerkten sont de l'ordre de 425 mm, dont une partie non négligeable est sous forme neigeuse en hiver (décembre à février). La saison pluviale s'étale d'octobre à avril et apporte 62 % du volume d'eau annuel. La saison sèche s'étale sur 5 mois, avec des températures élevées et donc des besoins en eau d'irrigation importants. L'irrégularité annuelle est connue. Une année sur cinq est humide où les apports en eau sont suffisants pour recharger les nappes karstiques situées sur la montagne calcaire en amont de l'oued Msalt qui draine presque toutes les sources et résurgences d'eau de Tazlyda. Les paysans considèrent qu'une bonne année pluvieuse et surtout neigeuse sur les hauts plateaux d'Iifarwane et Adrar Gadrouz, permet d'avoir de l'eau pour deux années successives. La saison de croissance des végétaux dure presque 10 mois.

Les sols sont peu profonds (10 à 50 cm), rocaillieux et peu fertiles en particulier les sols bruns zonaux, les sols squelettiques (lithosols) et les rankers d'érosion développés sur schistes. Le pH est légèrement acide (6,7). Du point de vue structure, ces sols sont instables à cause de leur pauvreté en matière organique (moins de 1%) et de leur texture riche en limons et en sables. Ils sont perméables et assurent un bon drainage et beaucoup de pertes d'eau en profondeur par percolation. Les humidités à la capacité au champ des sols sur terrasses se situent entre 12 et 17 % : ils retiennent peu l'eau.

L'érosion hydrique est très active sur les versants dénudés schisteux et calcaires à pentes très fortes (>35%). Le surpâturage et les prélèvements excessifs en bois de feu sont les deux facteurs majeurs de la dégradation du couvert végétal à Tazlyda. Sur les versants calcaires exposés au sud, le ravinement creuse dans les substrats rocaillieux. Le village Iwguyne est souvent menacé par les chutes des blocs calcaires. Un aménagement de correction torrentielle a été réalisé par le service forestier pour la protection du douar et de la route provinciale.

4. Les ressources en eau et leur gestion

Les deux principales sources sont Tit Al Ain et Ihemamen. Elles ont toutes les deux un débit moyen annuel de 30 l/s. Toutes les autres tarissent en juillet et août, ce qui pose des difficultés pour l'irrigation des terrasses agricoles. La variabilité des débits des sources est intimement liée aux précipitations. Les eaux de ces sources sont de bonne qualité.

Les principales sources d'eau à Tazlyda sont les résurgences situées le long des berges des oueds provenant du plateau calcaire d'Iifarwane situé en amont du bassin de l'oued Tazlyda. Ces oueds donnent lieu à plusieurs sources déviées par des seuils en pisé (Ougougs) vers des bassins de stockage (Tamdas). Il est impossible de faire des prélèvements dans les oueds et les sources pour l'alimentation en eau potable des douars, car les eaux s'écoulant dans les oueds après les ougougs appartiennent aux douars situés dans la vallée à l'aval de Tazlyda. L'eau potable est assurée par apports d'origines lointaines ou par des forages réalisés par l'office national de l'eau potable.

Le remplissage des Tamdas se fait durant la nuit, de 18h30 au lever du jour. Chaque remplissage du bassin est considéré comme une unité « Fardia ». Le partage entre les ménages d'origines (Asl) a été fait en Fardia. Chaque ménage avait un nombre de Fardia

déterminé par la surface de ses terres irriguées. Avec le temps, ces Fardia ont été partagés par héritage entre les ménages. Actuellement, les durées sont très courtes, de l'ordre de quelques heures ou même de dizaines de minutes. Du Fajr à 11h, l'eau est réservée aux terres situées à l'amont du bassin. La durée est partagée entre les héritiers selon leur droit d'eau. A partir de 11h, l'eau est réservée aux terres situées à l'aval du Tamda. L'eau vient rejoindre celle sortante du Tamda. Le débit total de la séguia est envoyé sur les parcelles. L'usage de l'eau est communautaire et sa gestion est régie par des règles séculaires sous forme d'un droit verbal réglant la durée d'accès à l'eau de la source, le tour d'eau et la succession dans le douar.

Dans tous les douars de Tazlyda, le tour d'eau se fait sur 12 à 13 jours. C'est une durée jugée actuellement trop longue. Au moment du partage des eaux par les ancêtres même si le tour était long, cela était compensé par une durée d'accès à l'eau très longue. Pour Taboumenkaret, ayant 11 ménages d'origine (Asl), cette durée était de 26 h. pour chacun d'entre eux. Actuellement, elle n'est que 5 h en moyenne. En outre, le débit est très variable selon les saisons : 30 l/s en hiver et 10 l/s en été. Cela handicape le développement des activités agricoles.

5. Les techniques traditionnelles de gestion des ressources.

A l'instar de toutes les montagnes marocaines, les potentialités limitées en ressource ont conduit les paysans à développer un savoir local très riche. L'eau est mobilisée pour les usages les plus efficaces. La terre est aménagée pour créer des parcelles plus productives. Des techniques agronomiques et d'élevage sont utilisées pour une meilleure durabilité de la production. Les prospections de terrain et les discussions avec les paysans ont permis de décrire et analyser les techniques citées ci-dessous.

5.1. Techniques de mobilisation de l'eau

Technique 1. Seuils de prise d'eau dans les oueds (Ougougs)



Seuils de dérivation de l'eau des sources et de l'oued vers la séguia et le bassin

Description et coût :

Un seuil en pisé renforcé de pierres (Ougoug) est construit au travers du lit de l'oued pour canaliser les eaux des sources et des écoulements de l'oued vers la séguia, puis vers le bassin de stockage (Tamda). Ces seuils traditionnels sont de dimensions variables selon l'importance du lit de l'oued et des eaux qu'il va dévier. Ceux construits sur l'oued Msalt, ont une épaisseur de 80 cm, et des hauteurs et largeurs dépendant du lit d'oued. Celui de la source Tit Al Ain a une hauteur de 3 m et une largeur de 13 m. L'eau canalisée par les Ougougs est utilisée essentiellement pour l'irrigation des terrasses agricoles et dans une moindre mesure pour l'abreuvement du cheptel.

Construits d'une manière traditionnelle, les Ougougs demandent essentiellement de la main d'œuvre. Les pierres sont ramassées sur les versants et le sable dans le lit de l'oued. Un Ougoug de 13 m de large, 3 m de hauteur et 80 cm d'épaisseur a nécessité 25 jours de travail pour deux personnes (4 500 dh). Un seuil similaire construit en béton et à l'entreprise coûterait environ 250 000 dirhams (en 2018). Tous les seuils traditionnels sur l'Oued Msalt ont été construits sous forme d'un travail communautaire des douars appelé « Twiza ». Tous les ménages concernés ont contribué au travail et à l'alimentation des travailleurs : personne n'a été payé en cash.

Ces seuils en pisé ne sont pas stables. Après chaque crue, ils sont endommagés et présentent souvent des fuites d'eau. Les villageois les suivent régulièrement et les réparent comme ils les ont construits (Twiza). L'opération d'entretien est requise après les pluies en préparation de la saison estivale où les besoins en eau sont importants. Souvent, 2 à 4 personnes arrivent à réparer l'Ougoug du douar en 4 jours de travail.

Technique 2. Séguia reliant les Ougougs aux parcelles



Séguia sortant d'un Ougoug (Tit Al Ain)

Séguia transportant de l'eau vers le Tamda



Séguia entrant dans le Tamda
Taboumenkaret



Séguia dans un champ de céréale donnant
sur les planches d'irrigation

Description et coûts :

La séguia est un chenal de transport d'eau par gravité. La séguia principale transporte l'eau de la source ou de l'Ougoug vers le Tamda. C'est la séguia entrante. Une seconde séguia transporte l'eau du Tamda vers les champs cultivés. Sur ces séguias sont installées des prises d'eau « Tout ou rien, TOR » faites de matériaux locaux. Elles alimentent des séguia secondaires irrigant les terres d'un groupe de paysans (lignage). Ensuite, ces séguias secondaires sont partagées en séguias tertiaires amenant l'eau au niveau des parcelles. A l'intérieur des parcelles, les séguias quaternaires répartissent l'eau sur les planches d'irrigation.

Les séguias principales sont construites en béton. Un mètre linéaire coûte environ 250 dirhams. Elles sont dans des états lamentables au niveau des prises d'eau et certains biefs présentent des fissures. Les pertes en eau sont d'environ 50 % entre la source et le bassin. Les autres séguias sortantes sont également en mauvais état. Elles sont en terre tassée et perdent beaucoup d'eau par infiltration. Les pertes en eau sont estimées par les paysans à 30 % entre le bassin et les parcelles irriguées. Cette infiltration permet de faire pousser de l'herbe maintenue sur les bords pour produire du fourrage. Ces herbes permettent de consolider les bords des séguia. Ces derniers peuvent jouer le rôle de limite de parcelles et de propriétés. A l'intérieur des parcelles, l'irrigation se fait dans des petites planches (Haoud) très réduites (1 à 5 m²) et limitée par des billons en terre pour mieux canaliser l'eau.

Quand on hérite d'une terre, on l'acquiert avec son eau. Une planche (Bhira) irriguée sur terrasses de 150 m² vaut actuellement à Ait Ouabarab 15 000 dirhams car les ressources en terre et en eau sont rares.

Ces ouvrages nécessitent un suivi régulier. Les fissures et les cassures doivent être réparées. Les fonds doivent être curés des algues et des sédiments apportés par érosion. Chaque année avant la saison printanière, les fonds des séguias en terres doivent être nettoyés et les bords reconstruits pour réduire les pertes en eau.

Technique 3. Bassins de stockage d'eau (Tamdas)



Bassin de stockage d'eau (Tamda)

Description et coût :

L'eau acheminée de l'Ougoug par la séguia est stocké dans un bassin appelé localement Tamda. Les anciens bassins étaient creusés dans la terre ou la roche par les communautés locales. Les parois construites en pierres sont cimentées par de la terre. Les fonds sont couverts par un dallage en pierres taillées et rendues lisses puis couvertes d'un enduit en terre argileuse. Depuis 1980 les bassins sont construits en béton armé. Ces Tamdas bétonnés ne présentent pas de pertes d'eau. Le seul problème qu'ils ont est le remplissage par les sédiments et les déchets apportés par les eaux. Leur curage se fait de moins en moins. Les volumes sont variables selon les apports en eau de la séguia. Ils sont conçus pour recueillir les eaux de toute une nuit.

L'objectif de ces bassins est de stocker l'eau pour une meilleure gestion. Etant donné que les eaux provenant des Ougougs sont de faibles débits (souvent inférieurs à 10 litre/s en été) les paysans préfèrent les stocker durant la nuit (de 18h30 au lever du jour) et les utiliser durant la journée. Le volume d'eau apporté par la séguia durant la nuit est ajouté à celui du jour et le débit d'irrigation est augmenté. Ainsi, l'eau peut aller loin de la source dans des séguias en terre. Ces bassins permettent aussi de partager les eaux entre les ayants droits. Un tour d'eau séculaire règle ce partage. Un bassin de 680 m³ construit en béton et à l'entreprise coûterait environ 300 000 dirhams. Les bassins anciens construits avec les matériaux locaux et dans le cadre de la Twiza demanderaient pour le même volume d'eau 30 jours de travail pour un contremaître (120 dh/jour) et deux ouvriers (60 dh/jour). Le coût total serait de moins de 10 000 dirhams. Depuis les années 1980, les paysans ne construisent plus les bassins en terre. Les Tamdas construits en béton sont très stables. Cependant, ils nécessitent des curages réguliers à chaque fois qu'ils reçoivent des sédiments (après la saison des pluies). Les vannes de prise d'eau (évacuation) et les échelles d'accès doivent être changées une fois défectueuses.

Technique 4. Collecte des eaux de ruissellement



Collecte des eaux de la piste pour irriguer un verger d'oliviers.

Recueil des eaux de piste pour irriguer des oliviers

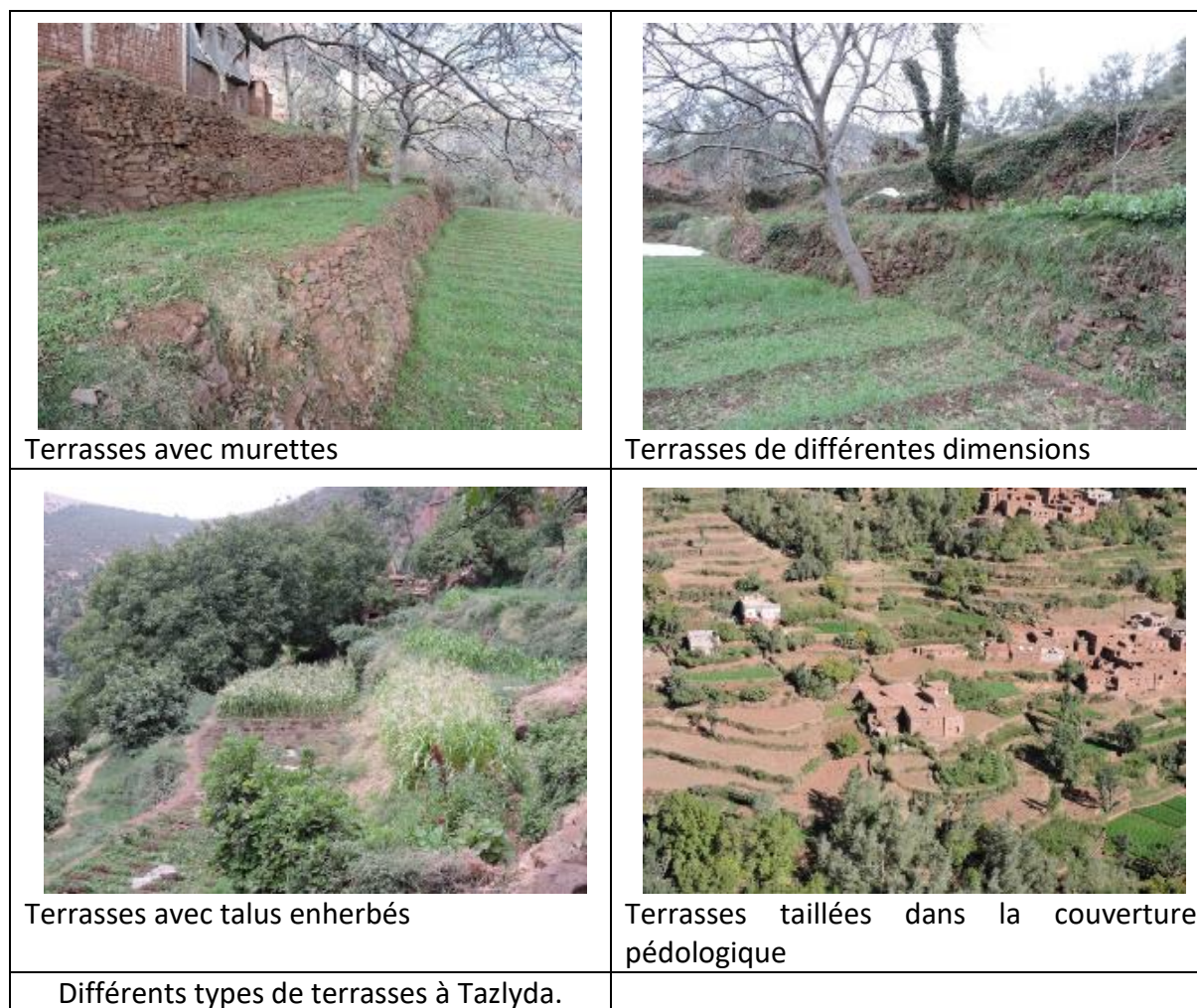
Les eaux de ruissellement produites par des terrains tassés de parcours ou des chemins sont collectées par un canal, puis dirigées vers une surface cultivée ou dans les cuvettes autour des arbres (noyers, oliviers). Les surfaces cultivées sont entourées de billons permettant le stockage de l'eau. Les arbres sont soit entourés de cuvette soit ils sont plantés sur des terrasses en gradins. Les eaux de ruissellement apportent aussi des fertilisants (sédiments fins, matières organiques, débris végétaux).

L'objectif est d'apporter de l'eau d'appoint aux cultures et aux arbres dans cette région semi-aride. Les cuvettes permettent de réduire le stress hydrique des arbres et les pertes en ruissellement, en sédiments et en engrais. Leur installation ne requière que du travail. Les paysans le font eux même sur leurs parcelles. L'entretien de ces structures est indispensable après les fortes pluies. Souvent, des dispositifs d'évacuation sont construits pour envoyer les ruissellements dangereux vers le ravin principal et vers l'oued.

Les billons (Abadou) installés sur les petites planches donnent un certain relief à la surface du sol réduisant significativement le ruissellement : ils permettent de piéger l'eau et d'augmenter la rétention de l'humidité du sol. Cette technique de collecte de l'eau permet donc aux plantes de mieux supporter les périodes de sécheresse dans ces zones semi-arides où le taux d'évaporation est généralement élevé pendant la saison de croissance.

5.2. Techniques d'aménagement des terres

Technique 5. Les terrasses en gradin



Description et coût :

Les versants en pente sont transformés en une série de gradins formés d'un talus protégé par des herbes ou une murette en pierres et d'un replat qui permet à la fois de stocker un volume d'eau et de sol suffisant pour la croissance d'arbres fruitiers et le développement de cultures intensives. La hauteur du talus est généralement comprise entre 1 et 3 m et la largeur de la terrasse entre 1 et 10 m selon la pente et l'épaisseur de la couverture pédologique meuble. Le fruit du talus est de l'ordre de 40 % s'il est nu, 20 % s'il est protégé par des herbes et arbustes, et 10 % dans les cas des murettes en pierres sèches. Les terrasses agricoles aménagées sur la rive gauche de l'oued Tazlyda sont issues d'une coupe dans la roche mère et une accumulation de sédiments apportés par les ruissellements des versants amont. Ces terrasses nécessitent des apports importants de fumier pour maintenir un degré de productivité acceptable. Le fumier (grossier) permet d'améliorer la structure des sols et donc leurs capacités de rétention en eau. Le fumier est apporté au moment des labours, en automne pour les cultures hivernales et au printemps pour les cultures printanières. D'après les ateliers et les enquêtes réalisés avec les paysans, trois ans sur cinq, ces terrasses sont en jachère en été.

Ces investissements en terrasses ne sont entrepris que sur des versants pentus (pentes > 40 %) qui peuvent être valorisés par l'irrigation. La terrasse est structurée en planches. Les risques de glissement de terrain sont réduits par la plantation et le maintien d'arbres (frênes,

chênes verts, oliviers, etc.). Ces arbres sont souvent placés sur les talus pour les renforcer. Le replat est généralement organisé en planches à pente longitudinale faible (1%) et à légère contre-pente vers le talus, ce qui lui permet d'évacuer les excédents d'eau lors des averses exceptionnelles.

Ces terrasses permettent d'offrir aux paysans des montagnes un espace cultivable et assurer leur sécurité alimentaire. Elles permettent de récupérer des eaux du ruissellement des impluviums de pistes et terrains de parcours situés en amont. Elles valorisent également les eaux des sources et des Tamdas, améliorent l'infiltration et réduisent l'érosion du versant et les débits de pointe de l'oued. Elles favorisent le stockage de la matière organique et des nutriments dans le sol, l'amélioration de la couverture du sol, de la productivité des terres, de la biodiversité et le stockage des pierres du sol sur les murettes. Ces aménagements permettent aussi de marquer clairement la propriété du terrain, de valoriser et de protéger des versants raides en montagne.

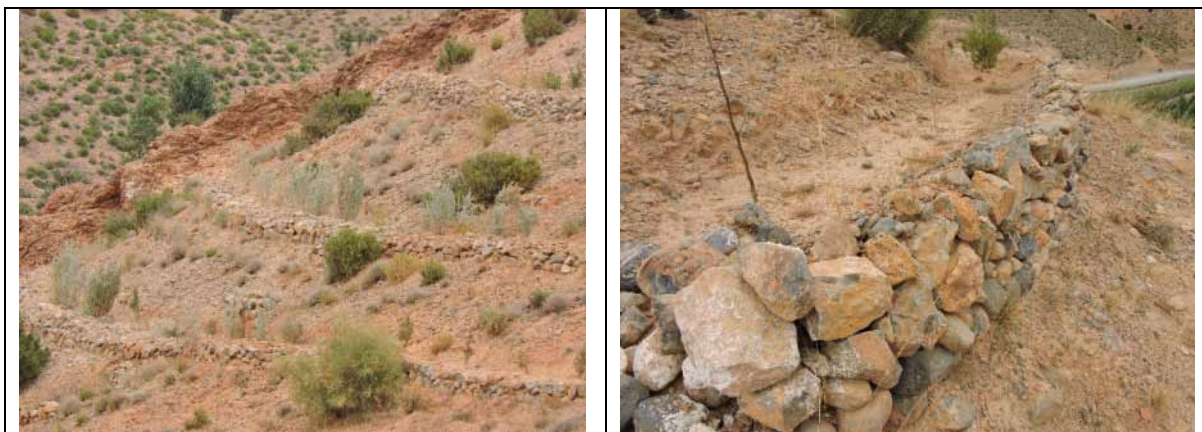
Des cultures à dominance de céréales y sont cultivées (orge, maïs). On y cultive aussi des légumineuses (haricots, fèves) et dans une moindre mesure du maraîchage. On y concentre la fumure organique disponible. Les arbres à usages multiples (frênes, chênes verts, caroubiers) y sont conduits pour produire du fourrage (feuillage), du bois de service et surtout contribuer à la stabilité des talus par assèchement du sol. Le frêne joue le rôle de tuteur pour la vigne et des lianes fourragères (lierre).

La construction des terrasses est très exigeante en main d'œuvre expérimentée. Elle demande entre 800 à 1500 jours de travail par hectare selon la pente, la nature du substrat et le type d'ouvrage. Leur entretien après les pluies requiert 10 jours/ha/an. Le travail du sol nécessite 10 jours/ha/an. La plantation des arbres 10 jours/ha/an. Leur taille une fois tous les ans nécessite 7 jours/an pour tailler 100 arbres. Les paysages qui façonnent les vallées de Tazlyda ont fait travailler plusieurs générations et sont un patrimoine à protéger.

Ces aménagements structurants les versants nécessitent un suivi et des opérations régulières qu'on peut résumer en :

- Entretien de la murette ou du talus, en particulier après chaque averse principale ;
- Protection de la partie aval de la terrasse par des pierres, des herbes ou des arbres afin d'éviter le glissement de la terrasse sous l'effet du drainage ;
- Restauration de la fertilité du sol par apport de fumier et de NPK pour intensifier la production.

Technique 6. Murettes en pierres sèches



Murettes en pierres sèches.

Description et coût :

Les murettes sont construites le long des courbes de niveau avec les pierres ramassées au fil des années dans les champs lors du labour. Au départ, le paysan nettoie quelques pierres et les arrange en cordons perpendiculaires à la pente. Au fur et à mesure que la terre est cultivée, les pierres sont ramassées et posées sur les anciens tas. Après quelques années, ces cordons deviennent des murettes de pierres d'environ 80 cm de hauteur et 50 cm de largeur. Elles ont une base plus large que le sommet. Les pierres sont arrangées de telles manières à éviter que les faces larges soient orientées dans le sens de l'écoulement. Parfois, la base de la murette est aplatie pour lui conférer plus de stabilité. Elles ont un léger fruit vers l'amont pour renforcer leur stabilité. Les espacements entre les murettes sont plus étroits sur pentes fortes : 5 m sur des versants de plus de 60 %, 10 à 15 m sur des versants de 30 à 15% % de pente. La construction des murettes sur une parcelle permet d'aménager une terre et la rendre facilement cultivable et plus productive. Elles permettent aussi de casser la vitesse du ruissellement, d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol et de ralentir l'érosion. Ces murettes sont très utiles pour la durabilité de la parcelle ; elles obligent le paysan à travailler le long des courbes de niveau. Elles sont aussi des limites de parcelles et de propriétés.

Leur confection nécessite principalement de la main d'œuvre. Les pierres sont déterrées du sol, transportées puis assemblées pour construire un muret. Un ouvrier payé à 60 dh/J et nourri (40 dh/J) peut faire 10 m linéaires par jour.

Les murettes sont contrôlées à chaque mise en culture des parcelles, notamment en automne. Les effondrements des pierres dus aux ruissellements ou aux passages des animaux sont reconstruits. Les tunnels ouverts à leurs bases par les rongeurs sont comblés. Les pierres déterrées par le labour sont rangées sur la murette.

5.3. Techniques agronomiques

Technique 7. La fumure organique des sols



Fumier déposé sur parcelle en préparation du labour printanier



Ramassage du fumier sur pente

Description et coût :

Le troupeau est maintenu dans l'exploitation agricole parce qu'il sert de caisse d'épargne (lait, viande) et il produit du fumier. Cependant, on constate que les agro-éleveurs accordent peu de soin à la production d'un fumier de qualité : la litière et les déchets de l'exploitation sont généralement entassés au bord d'une piste ou d'un ravin ensoleillé. Les fèces ne fermentent pas suffisamment. Le fumier perd son humidité (70%) et devient plus léger à transporter vers les champs, mais il a aussi perdu une bonne partie de l'azote, du carbone et de la potasse. De plus, il véhicule des maladies, des graines d'adventices et des germes contaminant le sol.

Comme le système d'élevage est extensif, avec une complémentation, le fumier produit est mélangé avec des déchets organiques frais, nécessitant alors toute une technique de compostage que les paysans ne maîtrisent pas, ce qui réduit la qualité du fumier produit. Presque tous les paysans ajoutent les résidus de la maison (balayures, épiluchures, vêtements) sur le tas de fumier. On n'a observé aucune vraie fosse compostière remplie des résidus de récolte, des cendres et d'autres déchets organiques. Avec les pluies abondantes en hiver, les nutriments solubles sont lessivés. Avec la sécheresse en été, la fermentation se fait difficilement si l'on n'apporte pas un complément d'eau déjà si rare à cette époque.





On estime qu'une vache laitière produirait 7 t de fumier frais par an. Pour produire la même quantité avec les caprins, il faudrait 7 à 10 chèvres ou brebis. Le transport du fumier du lieu de stockage aux champs pose beaucoup de difficultés car il s'agit de quantités importantes (1 à 8 t/ha) à déplacer sur des terrains en forte pente. Le transport sur les sentiers muletiers restreint forcément l'usage de la fumure organique aux champs voisins des étables et aux petites parcelles maraîchères irriguées et exploitées le plus intensément. Le fumier transporté à dos d'animal (mulets, ânes) est déposé sous forme de petits tas sur les parcelles et terrasses souvent au début des périodes des labours d'automne et de printemps. Avant le travail du sol à l'araire, il est étalé sur la surface puis mélangé au sol par

le labour. Souvent il n'est pas bien enfoui. Il reste en contact avec le soleil et l'air et perd beaucoup de sa qualité fertilisante et structurante du sol.

Les terrasses cultivées nécessitent des apports importants de fumier pour maintenir un degré de productivité acceptable. Le fumier grossier (bovins, équidés) permet d'améliorer la structure des sols et donc leurs capacités de rétention en eau. Le fumier fin (caprins, ovins), riche en azote, apporte les éléments nutritifs aux plantes. Les paysans mélangent les deux avant de les étaler sur les sols : 2/3 de grossier et 1/3 de fin.

Les fumiers de bonne qualité sont rares dans la zone, mais leur influence est favorable sur les rendements, leur restitution progressive des nutriments, leur effet positif sur le pH et les autres caractéristiques physiques du sol sont bien connues des paysans : sur des sols sablo-limoneux, les paysans sont convaincus que sans fumure organique, il y aurait peu de production.

Technique 8. Irrigation

	
<p>Une parcelle d'orge divisée en planches.</p>	<p>Des planches de cultures maraîchères.</p>
	
<p>Une planche de bersim submergée d'eau.</p>	<p>Des planches de diverses cultures. L'irrigation sert aussi aux oliviers.</p>
<p>Séguias et planches d'irrigation avec diverses cultures.</p>	

Description et coût :

L'irrigation à Tazlyda est indispensable pour assurer une production végétale suffisante pour nourrir la famille et les animaux. Elle est gravitaire. L'eau est ramenée au niveau des terrasses par un réseau de séguias. La terrasse est subdivisée en planches

d'irrigation par des billons faits à la sape. Ces planches sont de dimensions variables selon le type de cultures et la quantité d'eau disponible : 1 m² pour les cultures maraîchères à 10 m² pour les céréales. Les petites surfaces se remplissent rapidement et on passe à une autre planche. Souvent les paysans apportent entre 50 et 100 mm de hauteur d'eau par irrigation. L'orge est irriguée 3 fois durant son cycle (6 mois) et recevrait entre 150 et 300 mm/an. Le maïs est irrigué 6 à 7 fois durant 4 mois et recevrait entre 300 et 700 mm. Les cultures maraîchères sont irriguées jusqu'à 12 fois durant 4 mois ; elles recevraient entre 600 et 1 200 mm/an.

Les apports en eau sont excessifs par moments. Les pertes par infiltration sont importantes. Les sols ont des textures grossières et retiennent mal l'eau. C'est pourquoi les paysans préfèrent apporter du fumier grossier qui permet d'améliorer la structure du sol et donc sa capacité de rétention en eau. En outre, les rotations d'irrigation sont très espacées, de 12 à 13 jours.

Technique 9. Technique agroforestière : Association cultures / arbres fruitiers

Aspects historiques:

La valorisation des versants en pente en intégrant arbres, cultures et élevages est très ancienne. Elle pourrait dater des périodes où les éleveurs transhumants entre le versant nord-ouest humide et les zones désertiques du sud-est (Sahara) ont commencé à chercher des compléments alimentaires à leurs troupeaux. La dualité entre droit coutumier (Orf) et droit moderne a été à l'origine d'un processus important de défrichage et de mise en culture des terres forestières. On y observe une multitude de parcelles agricoles avec des arbres forestiers gardés pour les besoins fourragers (feuillage), de bois de feu ou de bois de services. La sédentarisation des éleveurs dans les vallées, sur les terres riches et à proximité des sources et des oueds a été accentuée. La démographie conséquente a engendré une occupation et une valorisation progressive des terres en pentes et toujours dominées par les séguias (conduits d'eau pour l'irrigation). Des aménagements fonciers colossaux et collectifs ont été entrepris par les paysans dans le cadre des organisations communautaires « les



jmaâ » des douars (Twiza). Des versants entiers ont été aménagés en terrasses méditerranéennes. L'investissement en travail (communautaire ou familial) est favorisé par la disponibilité de la ressource en eau provenant des sources. Ces aménagements fonciers ont été valorisés par la plantation d'arbres fruitiers. L'arboriculture associée à des cultures en sous étages sur aménagement foncier (terrasses) a envahi les versants et a valorisé le travail des paysans. La dynamique socioéconomique que connaît actuellement Tazlyda (en fait tout le Haut Atlas) a induit une réduction importante de la pression animale sur les espaces pastoraux. Les écosystèmes dégradés de chêne vert, genévriers et thuya commencent à se régénérer.

Structures :

Les systèmes agroforestiers correspondent à des parcelles agricoles, cultivées et plantées avec des arbres fruitiers, forestiers ou semi-forestiers : une dominance de l'olivier dans la zone basse chaude, le pommier et le noyer en altitude (climat froid) et le peuplier le long des berges des oueds et dans les agdals (Marj). Le caroubier est présent naturellement sur les versants rocaillieux, chauds et semiarides.

Dans les parcelles plantées en arbres fruitiers, les cultures céréalières (orge, blé tendre), légumineuses (petit pois, haricot), fourragères (luzerne, bersim, maïs) et maraîchères sont cultivées en sous étages et sont conduites en allées (alley cropping). Sur les fortes pentes, les terrasses sont étroites et les arbres sont plantés sur les bords (murettes, talus) pour renforcer leur stabilité et surtout laisser un peu d'espace pour les cultures et réduire les effets de l'ombrage et de la concurrence vis-à-vis des éléments nutritifs et l'eau.

Les arbres naturels issus des forêts défrichées (chênes verts, frênes), sont volontairement laissés sur les limites des parcelles ou des propriétés. Ils offrent aussi des appuis et renforcements aux murettes et talus des terrasses. Certains sont laissés à l'intérieur des parcelles. Ils sont traités pour fournir des perches, des poutres, du fourrage (feuillage) et du bois de feu. Les frênes et les chênes verts dispersés sur les terrasses sont conduits en arbres fourragers traités en têtards.

Aspects de gestion :

Les plantations d'arbres fruitiers sont souvent à forte densité. Les arbres, plantés dans des trous de 50 x 50 x 50 cm, ne suivent pas de disposition régulière. Ils sont généralement plantés sur le bourrelet, mais parfois en bas du bourrelet en aval et même au fond du gradin. Durant leur jeune âge (5 ans), avant l'installation d'une ombre dense, les cultures sont associées en intercalaire. Dans les vergers anciens, les arbres sont rarement taillés et traités contre les maladies et ravageurs. L'introduction de l'arboriculture sur terrasses a multiplié les revenus par dix.

La succession des cultures sous étages suit une chronologie particulièrement adaptée au système agraire mixte où la production animale continue à être importante, notamment pour le cash de la trésorerie. Durant la saison hivernale (octobre-avril), les parcelles sont emblavées en céréales pour la production de grains et de paille. Durant la saison estivale (juin-septembre), les cultures fourragères (maïs, bersim) constituent l'alimentation essentielle de l'élevage en stabulation (vache laitière, engraissement). Durant la courte période entre ces deux saisons les parcelles sont mises en jachère. Depuis quelques années, certaines plantes aromatiques et médicinales (PAM) commencent à se développer dans la zone : iris, verveine, ail, safran, etc. Leur apport au revenu de l'exploitation est important.

Ces plantes trouvent aussi leur place dans l'exploitation agricole paysanne du fait que les paysans prennent le soin de diversifier leurs cultures pour réduire les risques liés aux attaques parasitaires, aux aléas climatiques et aux variations des prix sur le marché.

Les cultures maraîchères sont réservées à certaines petites parcelles proches des maisons pour être gardées. Les paysans y cultivent des légumes de toutes sortes (haricots, petit pois, carotte, navet, oignon, ail) et des plantes à usages domestiques (menthe, absinthe).

Les parcelles sont travaillées deux fois par an. Les sols sont appauvris par une mise en culture intensive. Avant chaque labour, les paysans étalent du fumier à raison de 6 tonnes/ha/an. Ce fumier est produit dans l'exploitation par les animaux qui pâturent en forêts (caprins, ovins) ou en stabulation (bovins, équidés). Ceci constitue un transfert de fertilité des terres pastorales vers les terres cultivées. Son processus de fabrication traditionnel (à l'air libre) fait de lui un fumier de mauvaise qualité. Le travail du sol est soit à l'araire (traction animale), soit manuel (houe). Il est peu profond, au maximum 15 cm. Les paysans sont obligés d'ajouter des engrais minéraux (N, P, K) achetés dans les marchés locaux. Au moment du premier labour (fin septembre), ils mettent des engrais de fond (phosphore et potassium). Les engrais azotés sont donnés au début du printemps.

Les arbres et les cultures sont irriguées plusieurs fois par an et essentiellement entre mai et septembre : les arbres fruitiers une fois tous les 24 jours, les légumineuses une fois tous les 12 jours, les maraîchages une fois tous les 7 jours.

Produits :

La production dans ces systèmes agroforestiers est très diversifiée et est étalée sur toutes les saisons de l'année. La production végétale principale tourne autour de :

Grains de céréales pour l'alimentation humaine (fabrication de pain, aliment de base) et animale. La production est souvent autoconsommée. Les ventes sont rares, sauf en période de crise. Les rendements sont relativement faibles vues les conditions de fertilité des sols, l'origine locale des semences et du mode de conduite des cultures (manque de traitements phytosanitaires). La culture des céréales vise aussi la production de fourrage pour les animaux (herbes, paille). Les rendements à l'hectare sont en moyenne de 8 quintaux pour le blé dur, 7 quintaux pour l'orge et 5 quintaux pour le maïs ;

Grains et gousses des légumineuses destinés essentiellement à l'autoconsommation humaine (gousses vertes). Les fèves (graines) sont données aussi aux animaux en engraissement (veau et agneau de l'année). Le rendement moyen de la fève, pois chiche, lentille et petit pois varie de 6 à 8 quintaux/ha. Ils sont comparables aux moyennes nationales ;

Les produits maraîchers : ces cultures sont très limitées et sont destinées à répondre en partie au besoin des paysans à l'exception de la pomme de terre : cultivée sur les terrasses en altitude, elle constitue un apport important au revenu de l'exploitation. En effet, une parcelle d'un Khadam (1/10 ha) peut produire 1,5 à 5 tonnes/an. Avec un prix au marché qui varie de 3 à 4 dh/kg, un Khadam peut apporter entre 4 500 à 20 000 dh à la trésorerie du paysan ;

La production fruitière : les pommes sont destinées au marché. La production est vendue localement à des grossistes qui la stockent et la conduisent par la suite aux marchés régionaux. Un verger de 10 arbres de rosacés contribue à hauteur de 6 000 dh/an au revenu du paysan. L'association des arbres fruitiers à des cultures

intercalaires (verveine) peut multiplier la valeur de la production végétale par 12 comparativement aux céréales ;

La production en foin est essentielle pour l'équilibre des exploitations. En effet, le cheptel constitue un élément important dans le maintien d'une trésorerie fluide durant l'année pour les travaux agricoles et pour les besoins du ménage. L'alimentation du bétail est assurée par les prélèvements directs en forêt (parcours), par les cultures fourragères (luzerne, bersim, maïs), par les céréales (paille, son) et par les arbres à usages multiples maintenus dans les parcelles pour cette fin ;

La production en bois de feu et de service : la taille des arbres (olivier) fournit une quantité importante en bois de feu. Les arbres à usages multiples fournissent des perches et du bois pour la fabrication des outils agricoles (manches, araires). Les peupliers conduits dans les agdals privés fournissent des poutres pour la construction des toits des maisons ;

Les plantes aromatiques et médicinales, de plus en plus conduites en sous étages dans les vergers, commencent à transformer les utilisations des terrasses. Les exemples les plus prometteurs sont la verveine, l'ail et l'iris.

Chez les paysans qui conduisent ce système agroforestier, l'amélioration de la production et sa diversification contribuent à améliorer le revenu des exploitations et ont un impact considérable sur la famille : disponibilité de plus de temps chez les femmes pour s'occuper du ménage, possibilité de scolarisation des enfants et notamment les filles, amélioration de la sécurité alimentaire, création d'activités génératrices de revenus et donc la réduction de l'exode des jeunes vers les villes à la recherche d'emplois. Un développement rural durable basé sur des innovations agroforestières peut donc démarrer dans certaines vallées.

Services environnementaux :

Le terrassement, le maintien d'un couvert végétal permanent, la collecte des eaux de ruissellement (avec leurs sédiments) et la création d'un réseau de drainage stable permettent de :

- améliorer l'infiltration des eaux de pluie ;
- réduire le ruissellement, facteur principal de l'érosion des sols ;
- augmenter le stockage de l'eau dans le sol et améliorer son bilan hydrique et donc plus d'eau disponible pour les cultures et les arbres (eau verte) ;
- réduire les risques de crues et donc favoriser la stabilité des terrasses agricoles dans les vallées ;
- protéger le sol contre l'érosion hydrique par le couvert végétal maintenu à sa surface ;
- stopper la progression des sédiments venant de l'amont des versants et donc améliorer la fertilité des sols ;
- contribuer à la réduction de l'envasement des barrages en aval de oued R'dat;
- augmenter le taux de matière organique dans le sol, donc d'améliorer son agrégation, sa résistance à l'érosion, sa fertilité et sa productivité ; et d'autre part, contribuer à la réduction des gaz à effet de serre.

Photo 10. Agdal fourrager (En Amazigh : Marj).



Description, coût et fonctionnement :

Agdal en langue Amazigh (berbère) signifie mis en défens, accès interdit ou interdit d'exploiter. Le qualificatif « Marj » signifie souvent sous l'eau ou souvent humide. L'Agdal fourrager est un Marj. A Tazlyda, c'est une petite surface de terre privée, souvent sur pente (forte) et souvent irriguée. L'eau peut y couler toute la saison hivernale. Au printemps et été, elle est irriguée en abondance. L'eau d'irrigation est récupérée en bas de pente et conduite vers des parcelles cultivées. Les paysans y laissent pousser de l'herbe naturelle qu'ils commencent à faucher au printemps pour la sécher et la stocker comme foin à utiliser en période de froid et de neige (hiver). L'herbe est donnée essentiellement aux vaches en stabulation et aux chèvres et brebis retenues à l'écurie pour mise-bas ou maladies. Seules les vaches laitières peuvent y pâturer directement durant le printemps et l'été. Elles sont surveillées par les femmes ou les enfants. On peut les qualifier de prairies permanentes.

Du fait qu'elles sont souvent humides, les paysans y laissent pousser des peupliers blancs, une espèce ripisylve et drageonnante, à des densités très fortes (plusieurs milliers de plants à l'hectare). L'agdal fourrager est une sorte de bosquet conduit en futaie irrégulière. Les arbres sont d'âges et de ports très variables, des jeunes drageons à des vieux peupliers de plus de 20 m de hauteur. Les arbres en préparation à la coupe sont élagués chaque année pour produire des fûts rectilignes. Le bois du peuplier est prisé à Marrakech. Il est utilisé comme poutres de construction des toits des maisons. Les paysans coupent les gros arbres et les transforment en billes de 6 m vendues à l'unité (100 dirhams pour un billot de 6 m). Cependant, l'exploitation de ces bosquets est handicapée par le manque d'une infrastructure de débardage de ces grumes et de pistes carrossables dans la vallée.

En plus des agdals fourragers à peupliers qui sont les plus fréquents, on trouve aussi des agdals herbeux et des agdals avec une mixture d'arbres fruitiers (figuiers, noyers, amandiers) et peuplier. L'objectif est principalement de produire du fourrage. Mais si on peut valoriser encore mieux la terre et l'eau, des arbres sont plantés. La vente des agdals est vraiment exceptionnelle. Les ateliers réalisés avec les paysans n'ont pas montré un seul cas de vente à Tazlyda. Les agdals appartenant aux émigrés, sont utilisées à titre d'emprunts par leurs cousins ou voisins du douar restés sur place.

CONCLUSIONS

Les sols montagnards marocains en général et du Haut Atlas en particulier sont très sensibles aux phénomènes d'érosion pour des raisons écologiques (sols jeunes, pluies irrégulières et sécheresses récurrentes), historiques et démographiques. C'est pourquoi les populations locales ont développé des stratégies pour une bonne gestion de la biomasse et pour minimiser les risques d'érosion et la dégradation de leurs ressources naturelles. Ces paysans ont essayé comme ils ont pu d'affronter dans l'espace et dans le temps les difficultés de leur milieu. A travers des observations sur le terrain, des ateliers et des enquêtes avec les populations locales, les auteurs notent que les techniques ancestrales, développées par les populations du bassin de Tazlyda au Haut Atlas marocain afin de gérer leurs ressources naturelles, ont prouvé leurs effets favorables à travers le temps car ces paysans connaissent mieux que quiconque les spécificités de leurs milieux. Ceci n'a malheureusement pas empêché l'érosion hydrique de se développer, même si elle est beaucoup moins active dans les zones aménagées et bien entretenues. Actuellement, la durabilité de ces aménagements est menacée par la tendance des habitants à émigrer vers les villes si bien qu'il manque de mains d'œuvre pour les entretenir.

Pour restaurer la capacité de production des terres dans le bassin de Tazlyda, les paysans pratiquent tout un ensemble de techniques traditionnelles.

1. Le terrassement du versant en une série de gradins est réalisé sur des versants très pentus irrigables. Ces terrasses offrent aux paysans un espace cultivable qui joue un rôle important dans la sécurité alimentaire ;
2. Les murettes en pierres sèches sont construites le long des courbes de niveau avec des pierres sèches. Elles présentent une efficacité remarquable pour sédimenter les terres arrachées par les eaux de ruissellement et forcer le travail en courbe de niveau ;
3. L'application de la fumure organique est effectuée afin d'assurer un certain rendement : le fumier grossier (bovins, équidés) garantit un meilleur stockage d'eau dans le sol, tandis que le fumier fin (des caprins et ovins) améliore la fertilité chimique du sol grâce à sa teneur relativement élevée en azote. Cependant, les agriculteurs n'accordent pas autant d'intérêt à la qualité du fumier et ignorent la technique de compostage et la bonne façon de son application au champ ;
4. L'irrigation est une opération essentielle pour faire face aux problèmes du manque d'eau pendant les périodes sèches de l'année pour assurer la productivité des terres. Toutefois, elle est assurée par un réseau de canalisations (séguias) ouvert qui contribue aux pertes excessives en eau superficielle ;
5. Les systèmes agroforestiers pratiqués sont à dominance de type agrosylvopastoraux. Ces pratiques ont montré leur efficacité dans l'amélioration de la production et par la suite des revenus des familles des paysans qui les ont adoptées sur leur terrain. Elles ont impacté surtout la vie des femmes puisqu'elles ont contribué à générer plus de temps aux femmes pour s'occuper de leurs familles et à donner la possibilité de scolariser les enfants notamment les filles.
6. Les agdals (Marj) rencontrés dans le bassin de Tazlyda sont des prairies permanentes destinées à produire du fourrage et qui peuvent être classés en trois types : agdals à dominance de peuplier, agdals avec un mélange de peupliers et arbres fruitiers et agdals sans arbres. C'est un patrimoine socio-écologique qui a pu se maintenir au fil

des années jusqu'à nos jours. La particularité de ces agdals à Tazlyda est que bien que ces derniers sont privés (melk), ils n'ont jamais été sujets à la vente.

La gestion simultanée de l'eau, de la diversité du couvert végétal, de la fumure organique et minérale ont permis à ces populations de survivre depuis des siècles dans ces milieux montagneux arides.

Bibliographie

Bamoye K. 2006. Gestion sociale de l'eau et projet de modernisation hydraulique dans une vallée du Haut Atlas au Maroc : les Aït Hakim (des Aït Bouguemez). Audrey Richard-Ferroudji, Patrick Caron, Jean-Yves Jamin, Thierry Ruf. PCSI - 4e Séminaire international et interdisciplinaire, 2006, Montpellier, France. Cirad, 15 p., 2006. <cirad-00155660>

El Yadari H., Chikhaoui M., Naimi M., Sabir M. et Raclot D. 2019. Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc : aperçu et perspectives. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 7 (2): 343-350.

Laouina A. 2007. Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc : la diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres. Publ. de la FLSH, Univ. Mohammed V, Agdal, Rabat, 172 p.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome, *Bull. Pédol. Fao* n° 70,420 p.

Roose E., Sabir M., 2001. Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en zones méditerranéennes. Séminaire International de Montpellier, 2000 « Hydrologie des régions méditerranéennes » PHI-V. Doc. Technique en Hydrologie n°51: 101-109.

Roose E., Sabir M. et Laouina A. 2010. Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Éditions, Institut de Recherche pour le Développement, Marseille, 343 p.

Sabir M. 2002. Quelques techniques traditionnelles de GCES dans le bassin versant de Sidi Driss, Haut Atlas central, Maroc. *Bull. Réseau Érosion*, 21: 224-231.

Sabir M., Lichaa El-Khoury D. and Salman S. 2020. Field Guide for Hill Land Reclamation and Water Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO, Beirut, 2020

III. Résumé et conclusions principales

3.1. Cheminement d'un chercheur : des processus physiques d'érosion aux rôles des arbres , des animaux et des hommes

* Démarrant mes recherches début 1964, j'ai forcément été influencé par les idées de l'époque : l'approche géographique (Fournier) et pédologique (Aubert) des phénomènes d'érosion (les processus, leur vitesse et les facteurs modifiant leur efficacité), sur parcelles comparables (un seul sol, divers facteurs) et aboutissant à la modélisation (USLE de Wischmeier et Smith). J'en ai conclu que la lutte antiérosive ne pouvait se limiter à une organisation mécanique des paysages (réduire la pente et sa longueur), mais qu'il fallait avant tout couvrir le sol, intensifier le système de culture (Hudson) et plus tard, tenir compte de la culture des paysans/éleveurs, bénéficiaires de nos efforts vers une agriculture durable et rentable. Lors de nombreuses missions j'ai pu admirer **les techniques traditionnelles** permettant aux diverses tribus du Maghreb, d'Afrique occidentale, centrale et orientale de survivre depuis des siècles sur les glacis arides du Sahel ou sur les versants raides des collines et des montagnes : d'où la proposition d'une approche nouvelle « gérer l'eau, la biomasse et restaurer la productivité du sol » (= GCES).

*Pour estimer l'importance des processus en cause dans la dégradation de la productivité des sols en régions tropicales, je me suis d'abord efforcé de mettre au point **des techniques expérimentales pour mesurer in situ**, les apports par la pluie, depuis la forêt subéquatoriale (Abidjan) jusqu'aux savanes soudano-sahéliennes (et pour accélérer les recherches deux types de simulateurs de pluies), le ruissellement, l'érosion et le lessivage oblique (cases ERLO), le drainage dans des lysimètres cylindriques non remaniés et des techniques pour estimer l'état de la surface du sol. En parallèle au cours d'enquêtes, j'ai dialogué avec les paysans sur les risques d'érosion et l'efficacité des techniques de lutte antiérosive et de restauration de la productivité des sols. L'ensemble de cette démarche visait la compréhension de la dynamique actuelle des principaux sols tropicaux soumis aux aménagements imposés pour

développer des systèmes de production durables et intensifs pour surmonter les famines récurrentes dans ces pays du sud.

*Découvrant la **complexité des systèmes de production**, j'ai d'abord testé les techniques de travail du sol (du labour profond, buttage, sarclage et engrais verts) (Charreau), puis le travail réduit et finalement, comme sous forêt, au travail du sol assuré par la faune et la flore (structuration par la microflore, les vers, les termites, les litières et les racines) et le semis sous litière (SCV).

*Enfin, constatant que la conservation des sols exigeait beaucoup de travail sans augmenter nettement les revenus des paysans, j'ai compris que pour assurer la coopération des paysans, il fallait encore **restaurer la productivité des sols en rétablissant l'équilibre organique et les compléments minéraux indispensables** pour atteindre enfin les rendements élevés nécessaires pour valoriser le travail exigé par la conservation du capital foncier (aspects humains).

* Ce long cheminement à travers la géographie physique, l'agronomie, l'hydrologie, la conservation des sols et enfin à la restauration des sols, a abouti finalement à un éventail de solutions tenant compte des aspects culturels, des systèmes de cultures associées à la gestion des arbres, du bétail et des engrais.

3.2. L'érosion : ensemble de processus complexes, variables dans le temps et l'espace en fonction du milieu et de son mode de gestion

Pas de recette antiérosive unique : quelques leçons du passé.

*En milieu tropical, la température est élevée ainsi que l'évapotranspiration : d'où l'importance de la réserve hydrique du sol, du type d'argile et du taux de MO qui stocke beaucoup plus d'eau et de nutriments: d'où la dégradation rapide des rendements des cultures qui ne protègent pas le sol de l'érosion en nappe (perte de 40 % du rendement en grains si l'érosion en nappe atteint 4 mm).

*Grâce au réseau francophone de parcelles d'érosion en Afrique et à Madagascar et à la modélisation (USLE), nous avons cherché à comprendre pourquoi l'érosion est si élevée en Afrique : à cause de l'agressivité des pluies, de la fragilité des sols tropicaux ou de la topographie ?

***L'indice d'érosivité des pluies** (RUSA) varie de >1800 en zone équatoriale, à moins de 200 en zone sahélienne. Les pluies tropicales sont donc très agressives, 2 à 5 fois plus érosives qu'en zones tempérées. Non seulement le volume de pluies est très élevé, mais l'énergie par mm de pluie passe de 0,6 à proximité de la mer (Abidjan), à 0,5 dans les plaines tropicales, à 0,25 dans les montagnes tropicales (Cameroun, Rwanda, Burundi), à 0,2 en zones méditerranéennes et 0,1 en régions tempérées. Mais le volume et aussi la répartition des pluies (début et fin des pluies variables) jouent un rôle majeur sur la production des cultures. Il faut soit irriguer, soit augmenter la réserve du sol, soit choisir des cultures à cycles courts mieux adaptés au réchauffement climatique.

***L'érodibilité des sols** tropicaux n'est pas plus forte que dans les zones tempérées, mais les MO et leur fertilité évoluent plus vite. L'érodibilité des sols en régions tropicales varie de $K = 0,01$ à $0,40$ et $K = 0,20$ à $0,70$ en régions tempérées en fonction du taux de limon, de sable fin et de MO des horizons superficiels. Mais la capacité de stockage de l'eau et des nutriments est faible. D'où l'importance des MO, de la profondeur du sol et de la litière couvrant sa surface pour recharger le réservoir sol. Par contre dans les zones humides et chaudes, les microbes sont très actifs si bien que les MO qui structurent les sols, minéralisent beaucoup plus vite qu'en zones tempérées : les horizons cultivés perdent 50 % de leur teneur en MO en 4 ans si les sols sont sableux et en 10 ans sur les sols argileux. On comprend pourquoi les sols cultivés tropicaux perdent rapidement leur fertilité et leur productivité.

***Le travail du sol** joue un rôle majeur sur la profondeur de l'enracinement des cultures et la gestion des adventices, mais accélère la minéralisation des MO, donc la dégradation de la structure et l'érosion. Après de longues discussions entre chercheurs, il semble que la restauration d'un sol tropical profite d'un labour grossier à la reprise d'un sol dégradé, de cultures intercalaires de

couverture, suivi dès la deuxième année d'un semis direct sous une couverture végétale (résidus de culture, paillage ou légumineuses), mais laisse le sol nu et peu cohérent : des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation, puis des flaques d'eau s'étendent à la surface du sol et sa capacité d'infiltration passe de 100 à < 2mm/h. Le ruissellement augmente alors rapidement. Le labour et le billonnage en courbe de niveau stockent les premiers mm de pluie si la pente ne dépasse pas 15 %. Mais si la pluie dépasse 15 à 20 mm le ruissellement se concentre dans les points bas, casse les billons et creuse des ravines, plus difficiles à maîtriser. Par ailleurs, le travail du sol en courbe de niveau repousse la terre vers le bas de la pente créant une érosion aratoire non négligeable (= jusqu'à 50 t/ha/labour). Il est donc souhaitable de réduire le travail du sol et de laisser en surface une litière de protection.

***La topographie.** Les paysages tropicaux sont généralement formés de collines à pentes raides (demi-oranges des milieux ferrallitiques) ou de plateaux suivis de longues pentes douces (glacis des sols ferrugineux soudano-sahéliens). Les paysans commencent par cultiver les meilleures terres sur les colluvions et alluvions, puis s'étendent sur des terres plus pentues et plus fragiles. Certaines ethnies malgaches maintiennent les sommets sous forêt qui servent de château d'eau pour irriguer naturellement l'ensemble des versants cultivés. En montagne même les pentes très raides (40 à > 70 %) sont cultivables si la sécurité ou la densité de la population l'exige (ex/les Dogons du Mali ou les Hutus du Rwanda). Les terrasses en gradins coûtent très cher en temps de travail (> 600 à 1500 j/ha pour la construction et > 50 j pour l'entretien). Elles ne sont pas adaptées si les sols sont peu profonds ou très acides (Rwanda et Burundi). Par contre, le paillage (bananeraies, ananas, canne à sucre) ou les lignes d'arrêt (de pierres, herbes ou haies vives) ralentissent le ruissellement, et le travail du sol forme progressivement des talus (terrasses progressives) qui réduisent la pente (longueur et surtout inclinaison). L'érosion augmente avec l'inclinaison de la pente jusqu'à un seuil ($p = 60$ à 80 %) lorsque le trajet des gouttes de pluie poussées par le vent, est presque parallèle à la surface du sol. L'érosion commence sur des pentes faibles (<1 %) car la battance sur les glacis sahéliens entraîne rapidement le développement d'une croûte peu perméable et la formation de nappes ravinantes. L'effet de la longueur de pente varie

beaucoup en fonction de la rugosité de la surface du sol (labour grossier, billonnage ou paillis) et de la succession des sols le long des versants (forte infiltration sur les cuirasses, sols calcaires, vertisols, colluvions sableuses, etc). Cependant, le ruissellement démarre souvent en bas de pente plutôt que sur les pentes fortes, par résurgence des eaux d'infiltration (Heusch, 1972). Sur le terrain, il faut d'abord diviser le paysage en segments fonctionnels, puis adapter les cultures au terrain, et enfin adapter la pente du terrain aux cultures.

* **La couverture du sol** est le facteur le plus efficace que l'homme peut adapter aux paysages (C varie de 1 à 0,001). La forêt nous donne un bon modèle de ce que le système de production doit adapter : une canopée multi-étagée, une litière complète et continue toute l'année, le travail du sol effectué par la faune, un réseau racinaire de surface (pour capter la moindre pluie) et en profondeur (pour récupérer les eaux de drainage et les nutriments libérés de la roche et des déchets organiques). Ce n'est pas la canopée des arbres qui réduit le plus l'érosion : les gouttes interceptées s'accumulent au bout des feuilles et forment de grosses gouttes qui retrouvent leur énergie initiale au bout de 5 m de chute. Ce sont les arbustes, plantes de couverture (surtout celles qui rampent par terre), les mousses et litières qui absorbent jusqu'à 99 % de l'énergie des pluies et suppriment l'érosion en nappe (C= 0,001 %).

* **Les cailloux** ont des effets plus complexes : en surface, si les cailloux sont pris dans la croûte de battance, ils augmentent le ruissellement, mais réduisent l'érosion. En surface, mais dans un horizon perméable, les cailloux retardent la formation des croûtes et de l'érosion. Enfouis en profondeur, les cailloux ralentissent l'infiltration car leur porosité est plus faible (1 à 5%) que celle du sol (10 à > 40 %). En pratique on enlève progressivement les gros cailloux pour augmenter la surface cultivable et on les range sur un cordon pierreux. Par contre, on laisse les petits graviers qui absorbent l'énergie des gouttes et réduisent les risques d'érosion.

***La lutte antiérosive** s'organise donc à partir de la gestion de l'eau sur le versant : réduction de la pente et sa longueur (lignes d'arrêt, cordons de pierres ou haies vives de légumineuses, terrasses progressives, en escalier ou

en gradin) travail du sol grossier suivant la courbe de niveau. Ces structures sont bien visibles, mais demandent beaucoup de travail à la formation et à l'entretien et n'augmentent pas forcément les rendements des cultures. Bien plus efficaces sont les approches biologiques : parc arboré, verger + haies vives, bocages, cultures associées intensives, semis dense et surface du sol couverte de résidus organiques, interlignes protégées par des légumineuses de couverture ou plantes fourragères, fertilisation organique complétée par des apports minéraux en fonction des rendements souhaités.

**** L'évaluation des risques d'érosion en un moment donné.***

L'évaluation des facteurs de l'érosion d'un système de production donné s'effectue sur des parcelles d'érosion de 5 x 22 m. pendant au moins 4 à 10 ans pour tester toute la variabilité des pluies naturelles. Mais comme on ne peut attendre si longtemps les résultats avant de débiter les aménagements, on a développé plusieurs types de simulateurs de pluies mobiles de 1 à 50 m². Il s'agit d'avantage de mesurer le ruissellement et sa charge solide (= stabilité du milieu) que l'érosion réelle à l'échelle d'un versant (sédimentation localisée). Une autre approche plus rapide consiste à mesurer sur des diagonales l'état de la surface du sol, en particulier la surface dénudée (détermine la détachabilité), la surface fermée (cailloux, surface tassée, pellicules et croûtes de battance) qui détermine le ruissellement. On peut aussi évaluer les figures témoignant de l'érosion passée : turricules et microfalaïses, lits de sable et cailloux, nombre de rigoles et ravines /ha.

3.3. La restauration de la productivité des sols.

* Seul le système forestier (et les bananeraies denses avec litière de résidus de culture) est capable d'accumuler des matières organiques et minérales et d'enrichir le sol en région tropicale car les pertes par érosion, drainage et exportation sont minimales comparées à la production de biomasse. Dès que l'on défriche la forêt et qu'on dénude et travaille le sol, les fuites d'eau et de nutriments augmentent et ne sont plus compensées par les apports : les propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol se dégradent. La

conservation du sol réduit les pertes par ruissellement et érosion, mais la minéralisation des MO, l'exportation des récoltes doivent être **compensées par la fertilisation organique (litière, compost, fumier) et des compléments minéraux**. Comme les argiles tropicales retiennent très peu les minéraux, il faut gérer au mieux toutes les MO disponibles (environ 30 % des besoins) et compléter la fertilisation en fonction des besoins physiologiques des cultures (fractionnement des apports) et des exigences de production.

* La dégradation de la productivité des sols dépend non seulement des exportations, de l'érosion mais aussi de la lixiviation (entraînement des éléments solubles) par les eaux de ruissellement et de drainage très abondantes dans les zones équatoriales et tropicales humides. Il faut donc éviter d'enfouir en une fois de grosses quantités d'engrais (organiques et minéraux) alors que la pluie dépasse largement l'évaporation et que les jeunes plantes sont incapables de fixer les nutriments disponibles. Il faut donc **fractionner la fertilisation en fonction des besoins des cultures et densifier le couvert végétal** (cultures associées).

****La restauration durable des sols dégradés demande le respect simultané de six règles :***

- gérer l'eau sur les versants (structures CES et techniques culturales) ;
- restaurer l'infiltration par un labour initial grossier, puis un travail minimum ou le semis direct sous une litière de résidus de culture ou sous une couverture de légumineuses ;
- nourrir les cultures selon leurs besoins et les risques de pertes (fractionnement) ;
- cultures intensives, couvrantes, associées, multi-étagées (parc, verger, haies) ;
- restaurer la vie microbienne (litière, compost, fumier) et la faune (mini-tillage) ;
- corriger le pH du sol (optimum entre 5,5 et 7,5) et les toxicités aluminiques, calciques, sodiques.

Quelques leçons tirées du terrain.

3.4. Du Rwanda, Burundi, Madagascar, Haïti, Martinique

*Les spécialistes de la conservation des sols ont généralement les yeux fixés sur les fortes pentes cultivées dans ces pays tropicaux constitués de collines en demi-orange, hauts plateaux et quelques montagnes volcaniques. Ils concentrent leurs efforts sur les terres les plus dégradées.

341. Par où commencer : les pentes raides et les sols dégradés ou les terres fertiles ?

*Comme c'est souvent de ces ***pentés raides cultivées*** que viennent les terres érodées, les ravines formant les sédiments obstruant les rivières, provoquant les inondations des plaines où sont situées les villes, les projets de conservation des sols commencent par réduire l'inclinaison et la longueur des pentes par des travaux mécaniques (fossés de diversion, banquettes d'absorption, terrasses progressives ou en gradins, chemins d'eau, etc) et biologiques (haies vives, reforestation, vergers et prairies permanentes, rotations, bandes enherbées, etc). ***L'objectif est de garder des terres cultivables pour les générations futures et protéger les zones irrigables et les villes situées dans les vallées.*** Bien que les études en parcelles aient démontré qu'il est tout à fait possible de produire durablement sur des pentes de 25 à 60 %, on observe que les paysans acceptent souvent ces projets car ils sont sources de financement ; mais après la fin des projets, beaucoup de paysans pauvres reviennent à leurs techniques traditionnelles pour diverses raisons (perte de surface cultivable en faveur des talus, fossés, haies, coût des engrais, exigence de travail d'entretien qui réduisent le temps nécessaire pour soigner leur terres ou plus naïvement, «les fourrés attirent les nuisibles, les oiseaux granivores et autres serpents »... !

****D'abord les vallées et les meilleures terres***

*Or, les paysans des hautes terres de Madagascar concentrent leurs efforts d'abord sur leurs rizières, aménagent les ravins et versants par le feu, concentrent le ruissellement des premiers orages pour préparer le lit de

semence, enfouissent le fumier disponible, aèrent le sol des vallées avant de l'inonder pour repiquer le riz. L'aménagement des versants (tanety) n'intervient que pour compléter la surface limitée des rizières, varier la production de nourriture et réduire les risques d'ensablement des rizières....

*Le projet de développement du bassin de Gros Morne, en Haïti, a choisi de **renflouer les revenus des paysans en aménageant d'abord les ravines à fond plat par des seuils bétonnés résistant aux tornades tropicales**, accumulant l'eau de ruissellement et les sédiments riches en MO, pour produire rapidement à différentes échéances les produits du maraîchage (3 mois), des plantes bisannuelles (manioc, bananiers, papayers, cannes à sucre) et des arbres fruitiers greffés pour le marché local et international (mangues, citrons, arbres à pains). Pour permettre un élevage (pour le fumier) et une irrigation d'appoint (vente précoce au marché), sont creusés des puits et des réservoirs d'eau. Des haies vives produisent du fourrage, tandis que des «bandes d'arrêt» fournissent du fourrage, des ananas et des cannes à sucre. Par la suite sont plantés des vergers sur les colluvions irrigables, des prairies permanentes sur les versants trop raides et au sommet sur les terres caillouteuses des petits bosquets pour le bois de construction et d'énergie. En quelques années, le paysage s'est modifié favorisant l'infiltration et réduisant les inondations dans les vallées principales.

Mais la clé de la réussite de ces projets de développement durable est l'amélioration rapide du revenu et des connaissances des paysans (Brochet, et al., 2017).

342. Importance de la pente

****En montagne, il n'y a pas forcément de relation directe entre la pente, le ruissellement et l'érosion.*** Sur parcelles d'érosion, l'érosion augmente rapidement avec l'inclinaison de la pente jusqu'à un certain seuil (E Max 800 à 1000 t/ha/an vers 40 à 60 % de pente) après quoi les gouttes de pluie perdent leur énergie (chute tangentielle par rapport au sol), déchirent les pellicules de battance et maintiennent ouverte la porosité de la surface du sol : le ruissellement diminue, mais l'érosion augmente, lorsque la pente augmente

(Roose, 1973, 1994). Par contre, l'énergie du ruissellement s'accumule si la pente s'allonge. Les rigoles se développent en ravines (même sur des pentes de 1 %) : l'érosion en nappe reste presque stable. En réalité, les rugosités du terrain réduisent considérablement l'énergie du ruissellement en nappe : l'érosion sur les terrasses progressives dépend donc surtout des rigoles et de l'érosion aratoire.

*Par ailleurs, les eaux qui s'infiltrent sur les sommets peuvent circuler dans le sol et ressortir sur les versants au niveau d'une roche peu perméable ou dans les colluvions tendres. Dans les paysages calcaires, dolomitiques ou gypsitiques méditerranéens le ruissellement hypodermique peut creuser des galeries qui réapparaissent sur des pentes faibles et y creuser des gorges profondes.

343. Terrasses radicales en gradins ou terrasses progressives ?

* Quelles merveilles que ces paysages complètement transformés en gradins irrigués sur lesquelles poussent le riz en Indonésie, des cultures sous fruitiers en Chine, la vigne ou diverses fleurs en zones méditerranéennes ! Leur construction et leur entretien a coûté des milliers de journées de travail. Ces gradins ne se justifient que si on manque de terre adéquate ou en cas de guerre (ex les Dogons au Mali) et si on peut les irriguer et y faire pousser des cultures hautement rentables.

* A Madagascar comme au Maroc (Roose, Laouina, Sabir, 2010), on peut observer sur un même versant, les zones colluviales et alluviales aménagées en gradins irrigués et le reste du versant, non irrigué, plus caillouteux, portant des cultures plus rustiques sur des terrasses progressives en pente adoucie par des bandes d'arrêt enherbées, des haies vives, des cordons de pierres, ou des talus enherbés en courbes de niveau.

* Alors qu'en Chine, les paysans peuvent s'organiser pour tailler en gradins les collines de loess (matériaux riches et homogènes sur plusieurs mètres) et installer des cultures irriguées multi-étagées, le même travail sur des sols africains ferrallitiques acides et carencés aboutit souvent à un échec cuisant (rien ne pousse à cause du pH acide et de la toxicité aluminique) si on

ne peut investir à la fois 1 tonne de dolomie/chaux pour réduire l'acidité du sol, 10 tonnes de fumier et 250 kg /ha de NPK pour restaurer les activités biologiques du sol et produire des cultures rentables. Vu le prix des engrais, on perçoit toute l'importance de récolter une abondante biomasse pour couvrir le sol (paillage très efficace) et nourrir progressivement les cultures. Il faut bien comprendre que le transport de terre et la restauration de la fertilité du sol qui se réalise brutalement lors de la construction des terrasses radicales en gradins, devra se faire progressivement en une dizaine d'années pour les terrasses progressives. Alors que l'épaisseur du sol double en amont des haies (mais ne s'enrichit pas), elle diminue en aval du talus précédent, si bien que le paysan est souvent amené à construire un gros billon entre les deux, réservant les cultures exigeantes sur les terres épaisses et des cultures moins exigeantes sur les terres décapées de l'amont de la terrasse. Mais dans les deux cas il faudra apporter du fumier et des compléments minéraux pour valoriser au mieux ces aménagements en terrasses.

344. Les techniques culturales traditionnelles

Les techniques culturales traditionnelles apportent souvent beaucoup d'informations sur le bilan hydrique et l'adaptation aux contraintes régionales.

* **Brûlis après défrichement** : technique vivement déconseillée par la FAO car le brûlis entraîne la perte de plus de 90 % du C + N + bases + cendres et produits volatiles de la biomasse ainsi que la pollution de l'air. Répété trop souvent, le brûlis entraîne la dégradation du sol, mais il est parfois le seul moyen de se débarrasser de la biomasse qui encombre la surface du champ. Cependant il ressort de recherches récentes au Laos (Valentin) que les cendres et le charbon de bois ont une grande capacité de stockage de l'eau et des bases qui remplace celle des argiles (kaolinite) : ainsi certains sols noirs d'Amérique latine très sableux et lessivés sont actuellement relativement fertiles grâce aux charbons de bois. On propose actuellement un défrichement progressif, respectueux de la litière et du réseau racinaire, épargnant quelques dizaines d'arbres utiles (Lal, 1983).

* **Buttage, billonnage**: accumulation localisée de terre humifère permettant d'enfouir les adventices, divers résidus organiques et engrais minéraux et d'augmenter le volume de bonne terre pour les cultures de racines et des cultures associées. Cependant, ces buttes augmentent localement la pente du terrain meuble, réduisent le ruissellement mais augmentent l'érosion et la dégradation de l'horizon humifère. On propose de couvrir la surface des buttes et des sillons (ex riz semé dans les sillons entre les buttes d'igname en pays Sénoufo).

* **Labour grossier et billonnage en courbes de niveaux** : amélioration temporaire de l'infiltration si la pente est $< 15\%$. On propose de cloisonner les sillons sur les pentes faibles des glacis pour augmenter le stockage de l'eau si la saison des pluies risque d'être trop courte.

* **Gros billons courts dans le sens de la pente** : alterner tous les 5 mètres les billons et les sillons permet de ralentir le ruissellement et déposer les terres érodées surtout si les billons sont bien couverts par des cultures associées et les sillons par la terre compacte, des cailloux, des adventices ou des légumineuses (voir les billons bamiléké). Cette technique s'impose sur des terrains forts pentus, sujets aux glissements de terrains en cas de billonnage isohypse, mais elle n'empêche pas l'érosion aratoire.

345. La place des arbres : forêts, alignements, agroforesterie .

* La majorité des forestiers commencent par planter des arbres dans les ravines, les terres dégradées et les pentes très fortes. Certes, le bois d'œuvre et d'énergie sont indispensables au développement d'un pays, mais en Algérie la plantation de « la muraille verte, composée de milliers de pins, a montré que plantés sur des sols dégradés les arbres ne produisent jamais que des « bonzai » (broutés par les chèvres) dont on ne peut tirer que du bois de chauffe. Ainsi de nos jours, la Chine et les USA achètent en France les bois de qualité au point de créer chez nous une pénurie de bois d'œuvre qui ralentit le redémarrage de notre économie. On sait maintenant que c'est la litière et non la canopée des arbres qui amortit l'énergie des gouttes de pluie, réduit le ruissellement et l'érosion. König (2017) a démontré au Rwanda que la

plantation de 200 arbres /ha réduit en trois ans l'érosion en nappe de 500 à 150 t/ha/an sur une pente de 28%, les haies de légumineuses réduisent en deux ans le ruissellement à <2% et l'érosion à <5 t/ha/an à condition de gérer la biomasse produite en cinq coupes, 3 en paillis pendant les pluies et deux en saison sèche valorisées comme fourrage. En Rhodésie, Hudson (1973) avait démontré qu'un simple filet tendu à 10 cm du sol réduisait l'érosion d'un sol nu au centième. En montagne les arbres d'ombrages jouent un grand rôle dans les cultures du café et du cacao. En Tanzanie, Temple et Rapp, (1972) ont observé que les glissements de terrain sont nombreux sous culture lors de tempêtes tropicales, mais très rares sous forêt. Il semble qu'un simple alignement d'*eucalyptus* est capable de stabiliser une piste accrochée à flanc de montagne grâce à son puissant réseau racinaire. La plupart des arbres réservés pour réaliser un parc en zones tropicales, et particulièrement les légumineuses, ont un rôle important dans la conservation de la fertilité du sol, soit par la litière déposée autour des arbres, soit par les déjections des animaux qui viennent brouter le feuillage et les gousses, puis se reposer sous son ombre. Mais si on veut réduire la concurrence des arbres (racines et canopée), il est nécessaire de tailler les branches donnant trop d'ombre et les racines superficielles qui consomment trop d'eau (labour profond à 50 cm du tronc) pour favoriser les racines profondes.

En Casamance (Sénégal), dans les années 1950, la Compagnie Générale des oléagineux tropicaux (CGOT) a défriché mécaniquement 10 000 ha de forêt d'un seul tenant. On s'attendait au dessèchement des sols et des sources puisque la canopée condensait l'humidité des nuages et la litière réduisait le ruissellement de 25 % sous cultures à 2 % sous forêt. En réalité, on a observé une remontée de la nappe phréatique de dix mètres, car l'enracinement des cultures (maïs, riz, arachides) ne dépasse pas 1 m contre 5 m pour la forêt qui a pu évapotranspirer pendant toute la saison sèche (Roose, 1967).

Quant aux haies vives, elles canalisent les troupeaux, délimitent les propriétés tout en fournissant paillage, fourrage et abri pour diverses plantes et animaux. Mais pour ne pas réduire le rendement des cultures principales, il faut tailler

les haies 2 à 3 fois en saison des pluies et 1 à 2 fois en saison sèche. Il s'agit donc de « cultiver les arbres » en fonction des besoins des cultures principales.

Les bananiers ne sont pas des arbres, mais ils protègent mieux les sols que les jachères traditionnelles. Si on les cultive densément, ils produisent suffisamment de résidus de culture pour couvrir le sol et réduire drastiquement les pertes d'eau et de nutriments par érosion (Voir Rishirumuhirwa et Duchaufour). A la différence des forêts, il est nécessaire de fertiliser les sols généreusement. Moyennant ces compléments de nutriments, les bananiers protègent mieux les sols que les jachères traditionnelles, tout en produisant 30 t/ha/an de fruits.

346. Les plantes de couverture : choisir des graminées ou des légumineuses ?

Dans les années 1960, on a expérimenté en Afrique des cultures de céréales (mil, sorgho, etc) enfouies dans le sol avant la fin de la saison des pluies pour restaurer la MO des sols après 2 à 4 années de culture pure. Ce fut un échec, suite au refus des paysans « d'enfouir une culture avant la récolte » et aussi parce qu'on a observé que l'enfouissement de matières organiques fraîches accélère la minéralisation de l'humus du sol.

Dans les années 1980 s'est développée l'Agriculture de Conservation dont l'un des piliers est de garder le sol couvert et de semer dans les résidus de la récolte précédente. Mais pour les cultures sur billons, comme le maïs, le sorgho ou le coton, on a testé diverses plantes de couverture semées dans les sillons 3 semaines après la culture principale. Les graminées sont appréciées comme plantes fourragères mais elles sont trop concurrentielles pour les nutriments. Par contre les légumineuses ont souvent un réseau racinaire pivotant et profond et fixent l'azote de l'air ; outre un fourrage de qualité, elles peuvent fixer jusqu'à 250 unités d'azote à condition que le sol ne soit ni trop acide, ni trop pauvre en phosphore. Certaines légumineuses ne sont pas appréciées par le bétail et gardent le sol bien couvert (voir *Mucuna pruriens* au Bénin et *Calopogonium mucunoïdes* au Cameroun) et restaurent leur fertilité. D'autres légumineuses sèchent en saison chaude mais produisent beaucoup de graines,

améliorent le sol et la production et peuvent couvrir les talus et les bandes d'arrêt (*Stylosanthes guyanensis* ou *hamata*, *Desmodium intortum*).

Pour lutter contre l'érosion sur les fortes pentes d'Afrique de l'Est, dès la période coloniale, les agronomes ont introduit des lignes de graminées (*Pennisetum purpureum*, *Tripsacum laxum*, *Vetiver nigriflora*, *Bracharia ruziziensis*, *Setaria*, *Andropogon*, etc) qui poussent bien pendant 3 à 5 ans, puis les touffes se dégradent et ne filtrent plus bien le ruissellement. Plus récemment on a introduit des haies vives de légumineuses arbustives (*Leucaena leucocephala*, *Calliandra calothyrsus*, *Cajanus*, etc) qui constituent une jachère permanente sur 10 à 20 % du terrain et fonctionnent pendant plus de 25 ans (König, 2017), réduisent le ruissellement et l'érosion à des niveaux tout à fait acceptables tout en produisant une abondante biomasse de qualité, riche en azote (250 kg), phosphore (10 à 20 kg) et bases (20 à 40 kg). Il est déconseillé de planter d'abord des graminées puis des arbustes, car les graminées absorbent beaucoup de nutriments et réduisent la croissance des arbustes sur le long terme.

3.4.7. Le rôle de l'élevage pour la gestion de la fertilité des sols

L'élevage est généralement bien coté chez les paysans en tant que « caisse d'épargne », réserve financière (en cas d'accident, mariage, funérailles, etc...) et producteur de lait et de fumier (recyclage des résidus de culture et valorisation des parcours de brousse). Cependant, les cultures fourragères sont rares car, traditionnellement, « c'est à l'animal de nourrir l'homme et non à l'homme à nourrir l'animal ».

Or, une vache tropicale (250 kg) consomme 2 t/ha/an de matières sèches dont 40 % sont perdues sous forme de gaz, 30 % des fécès sont dispersés tout au long du parcours et il ne reste que 30 % de fécès qui s'accumulent dans les parcs de nuit (Guérin). Finalement, une vache produit dans la zone soudano-sahélienne 600 kg/an de « poudrette » (=fumier séché, piétiné, mêlé à la terre du parc).

Par ailleurs, on a observé qu'il fallait au moins trois t/ha/an de fumier pour maintenir la productivité d'une terre. Chaque vache exploite 4 ha de brousse et

produit 0,6t de fumier il faut donc 5 vaches x 4 ha = 20 ha de parcours ou 1 ha de cultures fourragères pour maintenir la faible fertilité d'un ha de champs cultivé. Non seulement les vaches n'apportent pas de fertilité (elles déplacent la biomasse) mais elles consomment et exportent les nutriments du sol à travers le lait et la viande exportés. Avec la poussée démographique, la terre devient rare et les parcours diminuent en faveur des champs cultivés. Par ailleurs, le pâturage entraîne une réduction du couvert végétal, le tassement du sol (la pression des sabots = 3 à 7 kg/cm² selon le poids des animaux) et la réduction de l'infiltration.

L'élevage garde un rôle majeur, celui de transformer une biomasse végétale brute en matières organiques riches en microbes indispensables pour rendre assimilables les nutriments bloqués dans les roches, les minéraux et dans la biomasse. Or Liebig a démontré, il y a plus d'un siècle, que les plantes ne peuvent se nourrir de MO si elles ne sont pas minéralisées par le microbiote du sol. On peut donc se demander pourquoi les engrais chimiques sont-ils plus polluants/acidifiants que les engrais organiques qui devront de toute façon passer par le stade minéral pour être assimilables par les plantes ??? Ne faut-il pas inculper le mauvais usage des engrais chimiques, plutôt que leur nature artificielle ???

En conclusion, la lutte antiérosive n'est pas une branche particulière de l'agriculture, mais elle doit s'intégrer dans un système complexe où l'homme, l'animal, les arbres, les cultures, les sols et leur microbiote, les paysages et les climats doivent trouver leurs justes places pour garder un équilibre toujours fragile du bilan de l'eau et des nutriments du sol. C'est pourquoi la GCES recherche en chaque biotope les solutions qui conviennent non seulement à l'environnement physique, mais aussi aux hommes qui le mettent en valeur.

Bibliographie

Brochet M., Saintill Clossy, Lilin Ch., Roose E., 2017. Aménagements hydro-agricoles : capture des eaux et restauration de la productivité des sols. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux ... », Eds.E. Roose, IRD Editions, Marseille: 565-580.

Heusch B., 1972. Etudes sur l'érosion. *Annales de la Recherche Forestière du Maroc*, Rabat n°12 : 174 p.

Hudson N.W., 1973. Soil conservation. Batsford, London.

König D., 2017. Potentialité de l'agroforesterie pour la restauration de la productivité des sols ferrallitiques acides du Rwanda. In « Restauration de la productivité des sols tropicaux... » Eds. E. Roose, IRD Editions, Marseille : 613-624.

Lal R., 1983. No-till farming. Soil and water conservation and management In the humid and sub-humid tropics. Ibadan, IITA, Monograph n°2, 64 p.

Temple P., Rapp A., 1972. Landslides in the MGETA area, Western ULUGURU mountains, Tanzania. Geomorphological effects of Suddan heavy rainfall. *Geografiska Annales* 54, 3-4 : 157-194.

Du même auteur, les publications les plus importantes

Roose E., 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement à Séfa (Sénégal). *Agron.Tropicale*, 22, 2 : 123-152.

Roose E., Bertrand R., 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion en Afrique de l'Ouest. *Agron.Tropicale*, 26, 11 : 1270-1283.

Roose E., 1972. Comparaison des causes de l'érosion et des principes de LAE en régions tropicales sèches, humides et méditerranéennes. In. « Journées d'études du GR », Florence, Italie : 417-441.

Roose E., 1976. Use of the USLE to predict erosion in Africa. SSSA, Special publ. 21 : 60-74.

Roose E., Lelong Fr., 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. *Rev. Géogr et Géol Dynamique*, 18, 4 : 365-374.

Roose E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Orstom, Paris. Travaux n°78, 125 p.

Roose E., 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. *Agron.Tropicale*, 33,2 : 132-140.

Roose E., Godefroy J., 1977. Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire : Azaguié, 1966-1973. *Cah.Orstom Pédol.* 15, 4 : 409-436.

Roose E., 1978. Dynamique actuelle de quelques types de sols en Afrique de l'Ouest : I méthode de terrain, II Azaguié sous forêt dense et Gonsé sous savane soudano-sahélienne. *Z. Geomorph. NF* BD 35 : 16-31 et 32-39.

Roose E., 1980. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse Doc. ès Sciences, univ. ORLEANS, 587 p.

Roose E., Lelong Fr., 1981. Factors of the chemical composition of seepage and ground waters in intertropical area (West Africa). *Journal of Hydrology*, 54 : 1-22.

Roose E., Fauck R., Lelong F., Pedro G., 1981. I., Importance des transferts en phase solide dans la dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. II Modifications de la dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux sous l'influence de la mise en culture. *C.R.Acad.Sc. Paris*, tome 292 série II : 1323-1328 et 1457-1460.

Roose E., Lelong Fr., 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., Masson F., 1983. Consequences of heavy mechanization and new rotations on runoff and loessial soils degradation in the North of France. *Comm.92 Intern.Conf « Preserve the land » Ankeny USA edit.* : 24-33.

Roose E., 1984. Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. *Machinisme agricole tropical*, 87 : 24-36.

Lelong Fr., Roose E., Aubert G., Fauck R., Pedro G., 1984. Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivée d'Afrique de l'Ouest. *Catena* 11, 4 : 343-376.

Roose E., 1986. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables en zone soudano-sahélienne. *Cah. ORSTOM Pédol.*, « Spécial Erosion » n°22, 2 : 197-209.

Roose E., 1987. Water efficiency and soil fertility conservation on steep slopes of tropical countries. In « Conservation farming on steep lands » Ed.Moldenhauer and Hudson, SWC Soc Ankeny, USA, 296 p.

Roose E., Sarailh JM., 1989. Erodibilité de quelques sols tropicaux. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 25, 1 : 7-30.

Shaxson T.F., Hudson N.W., Sanders D.W., Roose E., Moldenhauer W.C., 1989. Land husbandry : a framework for soil and water conservation. SWC Soc. Ankeny, IOWA, WASWC, 64 p.

Cosandey C., BoudjemlineD., Roose E., Lelong F., 1990. Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont Lozere (France).*Z. Géomorpho. NF.*, 34, 1 : 61-73.

Roose E., Kabore V., Guénat Cl., 1990. Le Zaï : fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah.ORSTOM Pédol.* 28, 2 : 159-173.

Roose E., Dugué P., 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 : 49-61.

Roose E., 1992. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols en milieu soudano-sahélien d'Afrique Occidentale. Influence du milieu physique et humain. In « L'aridité une contrainte au développement », Edition ORSTOM : p. 475-500.

Roose E., 1993. Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne. In « La jachère en Afrique de l'Ouest ». ORSTOM Paris, coll. Colloques : 233-244.

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R. Mazour M., Morsli B., 1993. Erosion en nappe et ruissellement en montagnes méditerranéennes algériennes. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 289-308.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédol. FAO*, n° 70, 420 p.

Roose E., Eds., 1996. Réhabilitation des sols et GCES. *Cahier ORSTOM Pédol.*, 28, 2 : 147-423.

Rishirumhirwa Th., Roose E., 1998. The contribution of the banana farming system to sustainable land use in Burundi. *Advances in Geoecology* 31 : 1197- 1204.

Boli Z., Roose E., 1998. Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its fertility under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of North. Cameroon. *Adv.in Geoecology* 31 : 395-402.

Roose E., Rattan Lal, Feller C., Barthès B., Steward B., 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Adv.in Soil Science*, Boca Raton, Fla. , 352 p.

Ratsivalaka S., Serpentié G., De Noni G., Roose E., 2006. Erosion et GCES. Acte des Journées scientifiques du réseau Erosion et GCES. Paris, Editions AUF et GB, 310 p.

Roose E., Albergel J., De Noni G., Laouina A., Sabir M., 2008. Efficacité de la GCES (gestion de l'eau et de la fertilité des sols) en milieux semi-arides. AUF, EAC et IRD Editeurs, Paris, 425 p.

Roose E., Sabir M., Laouina A., 2010. Gestion durable de l'eau et des sols du Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD Editions, Marseilles, 343 p.

Roose E., 2017. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agro-écologie. IRD Editions, 712 p.

Roose E., 2023. La GCES et la restauration des sols sur fortes pentes densément peuplées. Pour une agriculture tropicale raisonnée. Edition IRD, 270 p. (base Horizon)